



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA – MECATRÓNICA

DISEÑO E INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO
PARA EL PROTOTIPO CASA UNAM

TESIS DE MAESTRÍA QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. EMILIO HERNÁNDEZ COLINA

TUTOR PRINCIPAL
DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ
PROFESOR TITULAR, FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

MÉXICO, D. F. MARZO DE 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. ALEJANDRO RAMÍREZ REIVICH

Secretario: DR. LÓPEZ PARRA MARCELO

Vocal: DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

1er. Suplente: DR. ESPINOSA BAUTISTA ADRIÁN

2do. Suplente: DRA. CORONA LIRA MARÍA DEL PILAR

Lugar donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, México D.F.

TUTOR DE TESIS:

DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a CONACYT por el apoyo prestado vía beca de Maestría.

Esta investigación fue realizada gracias al programa UNAM-DGAPA-PAPIIT IT102214.

Deseo realizar los siguientes agradecimientos:

- A mi familia, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente y con amor, han hecho de mí la persona que soy.
- A mis abuelos, esos gigantes que caminaron aquí antes que nosotros y que de su mano nos llevaron por un sendero más verde.
- A mi tutor de tesis el Dr. Vicente Borja Ramírez, quien además de haber sido un excelente profesor, académico y persona, ha sido un gran amigo y ejemplo a seguir.
- Al Ing. Valente Vázquez Tamayo, quien nos asesoró y contribuyó enormemente en la etapa de manufactura.
- Al M.I. Yukihiro Minami Koyama, al M.I. Serafín Castañeda Cedeño, al M.F. Gabriel Hurtado Chong, al Ing. Erik Castañeda de Isla Puga, al M.I. Arutro Reyna Galindo, al Ing. Salvador García Burgos, al Ing. Hugo Serrano Miranda, a la M.I. María Sara Valentina Sánchez Salinas, quienes entre muchos más profesores de la Facultad de Ingeniería me formaron, inspiraron y enamoraron más de la carrera. Estaré siempre agradecido por sus enseñanzas y la manera de compartir sus conocimientos.
- A mi amigo, el Ing. Jorge A. Tenorio Hernández, quien fue parte muy importante durante la etapa de ejecución del proyecto y quien nos instruyó de forma teórica y práctica sobre instalaciones eléctricas y sistemas fotovoltaicos.
- A mis profesores de maestría el Dr. Alejandro Ramírez Reivich, por compartir su manera de analizar los problemas con base en el diseño y al M.C. Oscar Rendón Gómez por la forma de transmitir sus amplios conocimientos.
- Al equipo CASA UNAM, con quienes a lo largo de casi dos años trabajé en equipo y gracias a ellos se pudo tener una fructífera participación en el Decatlón Solar Europa 2014.
- A mis amigos, el Ing. Carlos Peña Pérez, el M.I. Rodolfo S. Vichis Martínez, el Ing. Carlos Canchola Hernández y el Ing. Salvador Sarabia Vázquez, quienes contribuyeron al desarrollo de este trabajo y al proyecto en general.
- Al M.I. Filiberto Gastélum Michel, al M.I. Enrique Munive Roldán, a la Ing. Amelia Jiménez Cano, al Ing. Rogelio Corona López y demás amigos y compañeros, que a lo largo de la carrera compartimos los mismos retos, enseñanzas y logros, de quienes también aprendí valiosas lecciones no sólo académicas y con quienes en numerosas ocasiones dedicamos gran parte del día y de la noche a concluir prácticas y proyectos.
- A los patrocinadores Schneider Electric y Holbein Labs, que gracias a su apoyo y colaboración se pudo desarrollar este proyecto y el trabajo aquí presentado.
- A la Facultad de Ingeniería, al Instituto de Ingeniería, al Instituto de Energías Renovables, a la Facultad de Arquitectura, a la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, a la Escuela Nacional de Trabajo Social y a la Escuela Nacional de Artes Plásticas, por haber hecho posible el proyecto y brindar apoyo académico durante todas las etapas del mismo.
- Y finalmente a mi alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, que ha sido fuente de conocimiento, cultura, inspiración y orgullo para un sinnúmero de alumnos y académicos que comprenden una vasta familia auri azul.

ÍNDICE

RESUMEN

1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 Objetivos	2
1.2 Alcances	2
1.3 Equipo de trabajo.....	2
1.4 Descripción general.....	2
2 ANTECEDENTES	3
2.1 Solar Decathlon	3
2.2 Solar Decathlon Europe 2014.....	4
2.3 Reglamento	6
2.3.1 Pruebas	6
2.3.1.1 Condiciones de Confort	6
2.3.1.1.1 Temperatura	6
2.3.1.1.2 Humedad Relativa	8
2.3.1.1.3 Dióxido de Carbono.....	8
2.3.1.1.4 Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's).....	9
2.3.1.1.5 Iluminación Natural.....	9
2.3.1.1.6 Desempeño Acústico.....	10
2.3.1.1.6.1 Aislamiento Acústico	11
2.3.1.1.6.2 Tiempo de Reverberación	11
2.3.1.1.6.3 Nivel de Ruido de los Sistemas Activos.....	12
2.3.1.2 Funcionamiento de la Casa.....	13
2.3.1.2.1 Refrigeración... ..	13
2.3.1.2.2 Congelación.....	14
2.3.1.2.3 Lavado de Ropa	15
2.3.1.2.4 Secado de Ropa	15
2.3.1.2.5 Lavavajillas	16
2.3.1.2.6 Horno	16
2.3.1.2.7 Tomas de Agua Caliente	17
2.3.1.2.8 Cocinado	17
2.3.1.2.9 Entretenimiento	18
2.3.1.2.10 Cena.....	18
2.3.1.2.11 Consumo de Agua	18

3 CASA UNAM	18
3.1 Equipo	18
3.2 Propuesta General	19
3.3 Prototipo	21
4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO	27
4.1 Identificación del problema	27
4.2 Identificación de las necesidades.....	29
4.3 Alternativas de solución	30
4.4 Evaluación y selección de alternativas.....	38
4.5 Especificaciones	40
4.6 Diseño de integración del sistema.....	47
4.7 Propuesta del sistema de control y monitoreo.....	53
5 PRUEBAS Y MANUFACTURA	59
5.1 Pruebas	59
5.1.1 Sensores	59
5.1.1.1 Temperatura	59
5.1.1.2 Humedad Relativa	60
5.1.1.3 Dióxido de Carbono	60
5.1.1.4 Monóxido de Carbono	62
5.1.1.5 Ozono	66
5.1.1.6 Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)	69
5.1.2 Valores objetivo	80
5.1.3 Programación y Simulación.....	81
5.1.3.1 Sistema de control de iluminación Clipsal.....	81
5.1.3.2 Sistema de monitoreo	89
5.1.3.3 Simulación	90
5.1.4 Pruebas en protoboard	91
5.2 Manufactura	93
5.2.1 Manufactura de los módulos de monitoreo.....	94
5.2.2 Manufactura del módulo de control.....	96
6 INSTALACIÓN E INTEGRACIÓN	99
6.1 Instalación del sistema de control de iluminación.....	100
6.2 Instalación del sistema de control y monitoreo.....	102
7 RESULTADOS	103
7.1 Resultados generales.....	104
7.2 Resultados de la prueba Condiciones de Confort	105
7.3 Resultados de la prueba Funcionamiento de la Casa.....	106
8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	108
8.1 Temperatura	108
8.2 Humedad Relativa	109
8.3 Concentración de Dióxido de Carbono.....	109

9	INSTALACIÓN EN UNIVERSUM	111
9.1	Trabajo actual	112
10	CONCLUSIONES	113
10.1	Prototipo CASA UNAM	113
10.2	Sistema de control y monitoreo	113
10.3	Aportaciones personales	114
10.4	Conocimientos adquiridos	114
10.5	Trabajo a futuro	114

REFERENCIAS

ANEXOS

RESUMEN

El trabajo aquí presentado se basa en el desarrollo de un sistema de control y monitoreo para el proyecto CASA UNAM, finalista para competir en la tercera edición del Solar Decathlon Europe, la cual es la competencia internacional más importante de vivienda sustentable a nivel universitario.

El proyecto CASA UNAM nace como una iniciativa para dar solución a diversos problemas presentes en la sociedad Mexicana, particularmente en su capital y zona metropolitana. Estos problemas son: falta de suministro adecuado de agua, altos tiempos de traslado y mala movilidad, autoconstrucción, escasos o ineficientes electrodomésticos y deficiencia en las instalaciones eléctricas, entre otros.

Con base en lo anterior, se crea un grupo que surge en la facultad de arquitectura de la UNAM con el fin de no sólo desarrollar este proyecto y llevarlo a una realidad, sino de ser un prototipo funcional capaz de competir en el Solar Decathlon 2014 en Versalles, Francia.

El Decatlón Solar nace como iniciativa del departamento de energía de Estados Unidos y reta a equipos universitarios a nivel mundial a diseñar, construir y operar viviendas sustentables que sean eficientes, asequibles y atractivas, con el propósito de acercar a los estudiantes y al público en general al uso de tecnologías limpias.

Dentro de este certamen, los prototipos de vivienda sustentable compiten durante varios días y son sometidos a rigurosas pruebas, tanto cualitativas como cuantitativas, con el fin de evaluar dichos prototipos y tener una retroalimentación del trabajo multidisciplinario de diseño que llevó dos años, donde cabe resaltar que el prototipo debe resolver problemas tanto para el entorno para el cual fue concebido, como para el marco local de la competencia.

Este trabajo engloba uno de los sistemas de ingeniería que hicieron posible la construcción, integración y prueba de este prototipo de vivienda sustentable que fue capaz de competir a nivel internacional con prototipos desarrollados por universidades de países como Francia, Alemania, Japón, Estados Unidos, Italia y Holanda, por mencionar algunos, y quedar dentro de los primeros tres lugares en tres de las diez categorías evaluadas.

Finalmente, después de un proceso de diseño, pruebas y manufactura, se muestra un análisis de los resultados obtenidos así como futuras mejoras e implementaciones con fines de investigación, automatización y ahorro de energía.

INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

Diseñar, manufacturar e instalar un sistema de control y monitoreo para el prototipo de vivienda sustentable CASA UNAM, con el fin de tener un buen desempeño en cuanto a las condiciones de confort y el funcionamiento en general durante la competencia Solar Decathlon Europe 2014 en Versalles, Francia.

1.2 Alcances

Se presentan en orden cronológico las etapas del desarrollo del sistema antes mencionado.

- Diseño de un sistema capaz de monitorear variables físicas y llevar a cabo acciones de control.
- Integración de componentes y pruebas de funcionamiento.
- Manufactura del sistema probado.
- Instalación del sistema en el prototipo de vivienda sustentable en México.
- Pruebas del sistema instalado.
- Instalación del sistema y pruebas en el prototipo construido en Versalles.
- Rediseño del sistema para su implementación en el museo Universum.
- Instalación final durante la construcción del prototipo.

1.3 Equipo de Trabajo

Durante el desarrollo de este trabajo se contó con varios integrantes de un equipo de trabajo, a quienes se les agradece sus aportaciones. Inicialmente fue el Ing. Emilio Hernández Colina (autor de esta tesis), y posteriormente se incorporaron los estudiantes de Ingeniería Mecatrónica: José Arturo Bravo, Rodrigo Valente, Diego Soto, Salvador Sarabia, Carlos Canchola y finalmente el Ing. Valente Vázquez, técnico académico del departamento de instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Por motivos personales y/o académicos varios integrantes del equipo se separaron, quedando al final: Emilio Hernández, Salvador Sarabia, Carlos Canchola y el Ing. Valente Vázquez, todos coordinados y apoyados por el Dr. Vicente Borja Ramírez.

Este equipo de Ingeniería trabajó hombro con hombro con cerca de 30 estudiantes de distintas disciplinas como Ingeniería, Arquitectura, Diseño Gráfico, Trabajo Social, entre otras.

1.4 Descripción General

La estructura de este trabajo se compone del diseño con base en los requerimientos para la competencia internacional Solar Decathlon 2014, seguido de los detalles de

funcionamiento de cada componente y del sistema en general, posteriormente se muestran los pasos seguidos para llevar a cabo una serie de pruebas de funcionamiento previas a la manufactura, los detalles y pasos de la misma, su instalación y pruebas del sistema una vez instalado y finalmente, las consideraciones de rediseño para su instalación en el museo universitario de las ciencias Universum.

2 ANTECEDENTES

2.1 *Solar Decathlon*

El Decatlón Solar (Solar Decathlon), es un concurso internacional que reta a estudiantes universitarios a diseñar, construir y operar viviendas sustentables que utilicen únicamente la energía del sol pero que al mismo tiempo sean asequibles, energéticamente eficientes y atractivas. El equipo ganador es aquel que se desempeñe mejor en asequibilidad, excelencia en diseño con una producción energética óptima y máxima eficiencia.

El objetivo original de este evento fue el de acelerar la incorporación de productos energéticamente eficientes con un diseño óptimo mediante tres rubros principales:

- Educar y concientizar a los estudiantes y al público en general acerca de las oportunidades de ahorro económico, energético y beneficios medioambientales que brindan los productos de energías limpias incorporando soluciones de diseño.
- Demostrar al público el confort y asequibilidad de viviendas que combinen una construcción enfocada a la eficiencia energética con electrodomésticos y sistemas alimentados por energías renovables.
- Acercar a los estudiantes participantes a un entrenamiento único que los prepare para ser parte del esfuerzo por utilizar energías limpias.[1]



Fig. 1. Villa solar del decatlón solar 2011 en Washington, D.C.

2.2 *Solar Decathlon Europe 2014*

El Decatlón Solar Europa, de igual forma que la versión Estadounidense, es una competencia internacional entre universidades que promueve la investigación y desarrollo de viviendas sustentables y eficientes. El objetivo de los equipos participantes es diseñar y construir prototipos de vivienda que consuman el mínimo de recursos naturales y produzcan la menor cantidad de desperdicios durante su ciclo de vida. Esta versión Europea hace énfasis en la reducción del consumo de energía y en la obtención de toda la energía necesaria de la radiación solar.

Los objetivos de esta edición europea son:

- Que los decatletas aprendan a trabajar en equipos multidisciplinarios para saber cómo enfrentar retos a futuro relacionados con soluciones innovadoras de desarrollo y construcción.
- Al igual que en la edición estadounidense, que el público se concientice de las posibilidades de reducción del impacto ambiental al adoptar tecnologías que utilicen energía limpia, manteniendo el confort y calidad de diseño en las viviendas.
- Adicionalmente, los voluntarios, quienes son esenciales para el desarrollo del decatlón solar, tengan la oportunidad de compartir experiencias con los equipos e interactuar directamente con el proceso de construcción y los prototipos de vivienda terminados, aunque su carrera sea totalmente diferente a las que convergen en esta competencia.[2]



Fig. 2. Observadores y voluntarios durante la construcción en el decatlón solar 2014.

La filosofía de esta versión europea del decatlón solar hace énfasis en seis ejes sobre los cuales los prototipos deben generar soluciones con el fin de satisfacer una lista de requerimientos, los cuales se engloban en:

- **Densidad.** Hoy en día, la mayoría de la población vive en ciudades en donde las áreas de construcción se han vuelto escasas y costosas, con lo que soluciones

para densificar estas zonas son necesarias con el fin de minimizar el impacto ambiental que el crecimiento actual de las ciudades ha ocasionado. Sin embargo, soluciones para localidades rurales pueden ser consideradas.

- **Movilidad.** Se refiere principalmente a la ubicación de la vivienda con respecto a los recursos como los supermercados, trabajo, ocio, servicios de salud, etc., dando pie a un menor consumo de energía, recursos y tiempo en transporte.
- **Sobriedad.** Cada año, la competencia evoluciona para incrementar los requerimientos de uso eficiente de energía. Es importante asegurar un suministro renovable de energía, pero es más importante aún limitar la demanda y por lo tanto, el consumo energético. Con lo anterior, se limita la potencia instalada de fotovoltaicos, repercutiendo directamente en un diseño enfocado a la eficiencia energética con el fin de incentivar a producir y consumir energía de manera inteligente.
- **Innovación.** Al ser una competencia académica, la innovación debe permanecer en el núcleo del proyecto considerando cada perspectiva del mismo: arquitectura, construcción, sistemas de energía, mobiliarios y electrodomésticos.
- **Asequibilidad.** Al ser una competencia orientada a la innovación, el involucrar empresas a un patrocinio puede resultar en un inevitable incremento de la inversión en equipo costoso y sofisticado. Por lo que los equipos deben tener en mente que la asequibilidad debe ser clave para soluciones reales de arquitectura sustentable y diseño urbano.
- **Versatilidad del Prototipo.** Cada equipo debe tener en cuenta al diseñar su prototipo que debe tener un buen desempeño y cumplir con las demandas culturales, sociales y climáticas del país de origen, así como durante el período de pruebas donde compite con los demás prototipos en el país sede del evento en la denominada villa solar. [3] La villa solar del decatlón solar 2014 se muestra en la figura 3.



Fig. 3. Villa solar (La cité du soleil).

2.3 Reglamento

Las reglas del decatlón solar están diseñadas para que todos los prototipos cumplan con los requerimientos de la organización y se promueva una competencia justa e interesante entre los equipos.

Las reglas para esta edición del evento están basadas en las reglas de ediciones previas, sin embargo, existieron cambios con respecto a los entregables y pruebas, añadiendo énfasis en el diseño urbano, la sustentabilidad, eficiencia energética, movilidad, innovación y aspectos de investigación, así como en la difusión cultural.

2.3.1 Pruebas

Con el fin de conocer al mejor prototipo, es necesario hacer una serie de evaluaciones con respecto a todos los criterios en los que impacta dicho prototipo. La competencia del Decatlón Solar Europa consiste en diez pruebas separadas con puntajes independientes. Cada una de ellas consiste en distintas sub-pruebas y criterios de valoración. El equipo con el mayor puntaje total es el ganador de la competencia.

Dichas pruebas se miden tanto cualitativamente mediante un jurado de expertos en el área, como el caso de la arquitectura, ingeniería y construcción, eficiencia energética, comunicación social, diseño urbano, transporte y asequibilidad, innovación y sustentabilidad, como cuantitativamente mediante un monitoreo constante o mediante el desempeño durante ciertas pruebas, como la eficiencia energética, el balance de energía eléctrica, las condiciones de confort y el funcionamiento de la casa.

Los detalles, puntajes y evaluaciones hechas en cada prueba pueden consultarse con más detalle en el documento SDE Rules, proporcionado por la organización del evento.

El trabajo aquí presentado se enfoca en dos de las diez pruebas del decatlón solar: condiciones de confort y funcionamiento de la casa.

2.3.1.1 Condiciones de Confort

Durante las dos semanas de pruebas se llevaron a cabo mediciones por separado de las variables relacionadas al confort y bienestar que toda vivienda debe tener para garantizar una estancia agradable en ella. Dichas variables fueron medidas mediante sensores montados en trípodes y colocados por la organización del evento en lugares estratégicos con el fin de recopilar datos y tener un registro del comportamiento y desempeño del prototipo durante la competencia.

2.3.1.1.1 Temperatura

La temperatura del interior de los cuartos fue medida constantemente durante los días de competencia, así como la del exterior con el fin de conocer el desempeño térmico de cada prototipo frente a las condiciones del exterior.

Se colocaron dos sensores de temperatura de tipo termómetros de globo, de acuerdo con el estándar CE 7726 [4], uno en cada habitación principal de la casa y, de ser necesario, se instalaría un tercer sensor dependiendo la geometría los cuartos y la arquitectura de la casa.

Todos los puntos disponibles son obtenidos si al término del período de prueba se mantuvo la temperatura promedio del interior dentro de un rango de dos grados centígrados, dependiendo el clima. Durante cada día de competencia a las 5:00 pm, la organización anunció el rango de temperatura objetivo para el día siguiente, de acuerdo al estándar EN 15251 (*Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance buildings-addressing indoor quality, thermal environment, lighting and acoustics*), con el fin de adaptar las condiciones de confort al clima. [5]

De acuerdo con dicho estándar, la temperatura promedio exterior del día está dada por la siguiente ecuación:

$$T_{ea}^{\circ} = \frac{T_{ed-1}^{\circ} + 0.8 T_{ed-2}^{\circ} + 0.6 T_{ed-3}^{\circ} + 0.5 T_{ed-4}^{\circ} + 0.4 T_{ed-5}^{\circ} + 0.3 T_{ed-6}^{\circ} + 0.2 T_{ed-7}^{\circ}}{3.8}$$

De donde, T_{ea}° es la temperatura exterior promedio del día y T_{ed-x}° son los promedios diarios de temperatura exterior de días precedentes. Con lo anterior, el rango de temperatura objetivo para cada día es calculado por la siguiente expresión:

$$T_{i \min}^{\circ} < T_i^{\circ} < T_{i \max}^{\circ}$$

En donde, T_i° es la temperatura objetivo,

$$T_{i \min}^{\circ} = 0.33 T_{ea}^{\circ} + 18.8 - 1, \quad \text{y} \quad T_{i \max}^{\circ} = 0.33 T_{ea}^{\circ} + 18.8 + 1$$

La relación de puntos obtenidos para esta prueba se muestra en la figura 4.

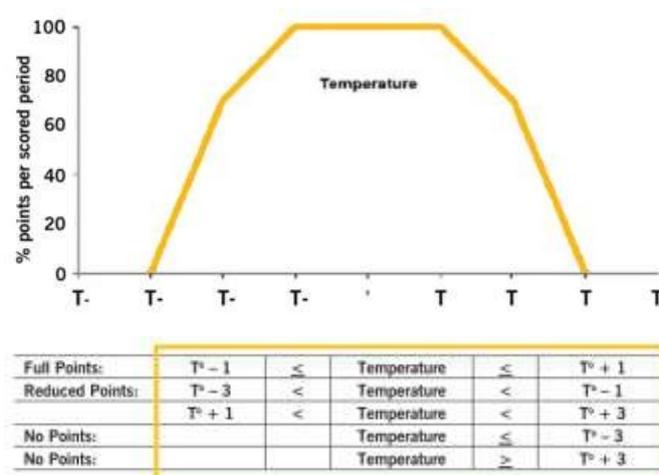
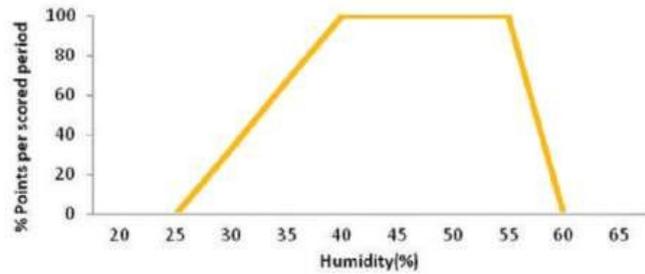


Fig. 4. Distribución de puntos de la prueba de temperatura interior.

2.3.1.1.2 Humedad Relativa

Al igual que para la temperatura, se llevó a cabo una medición constante de uno de los habitáculos donde a través de un sensor de humedad, se midió la humedad relativa. La obtención total de los puntos disponibles fue para los equipos que lograron tener una humedad relativa de entre el 40% y el 55% durante el período de pruebas. Una cantidad de puntos reducidos fueron obtenidos si la humedad relativa promedio del interior se mantenía dentro de un rango del 25% y 40% o dentro del 55% y 60%. La distribución de puntos otorgados se muestra en la figura 5.

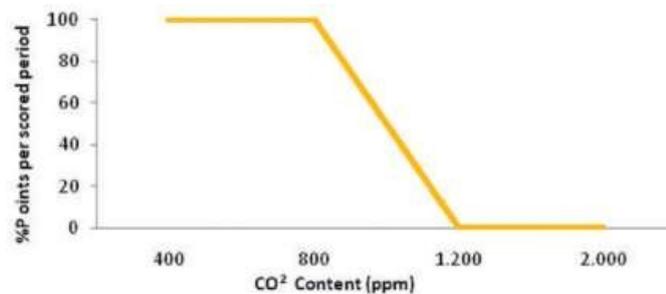


Full Points:	40%	<	Relative humidity	<	55%
Reduced Points:	25%	<	Relative humidity	<	40%
	55%	<	Relative humidity	<	60%
No Points:			Relative humidity	>	25%
No Points:			Relative humidity	>	60%

Fig. 5. Distribución de puntos para la prueba de humedad relativa.

2.3.1.1.3 Dióxido de Carbono

Otra variable importante a medir de manera constante en una de las habitaciones fue la concentración en partes por millón de dióxido de carbono. Dicha medición se llevó a cabo por el mismo sensor que midió temperatura y humedad (SCR110H de Schneider Electric). La concentración objetivo de la habitación principal fue de no más de 800 ppm para la mayor cantidad de puntos. La distribución de puntos otorgados para esta prueba se puede ver en la figura 6.



Full Points:		<	CO ² content	<	800 ppm
Reduced Points:	800 ppm	<	CO ² content	<	1200 ppm
No Points:			CO ² content	>	1200 ppm

Fig. 6. Distribución de puntos para la medición de dióxido de carbono.

2.3.1.1.4 *Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)*

Los compuestos orgánicos volátiles (VOC's) por sus siglas en inglés, son aquellos compuestos orgánicos liberados durante la aplicación de pinturas, pegamentos, aerosoles y demás productos químicos que contienen solventes o formaldehídos, los cuales son cancerígenos que tienen repercusiones fuertes en la salud en exposiciones prolongadas y síntomas como mareo o irritación de mucosas durante exposiciones cortas. Al no contar con un sensor de VOC's para un monitoreo constante, se realizó una medición puntual de los mismos en el mismo punto de medición de las variables antes mencionadas. Dicha medición consistió en tomar una muestra del aire contenido en la habitación principal y almacenada en una probeta para ser llevada a un laboratorio para su análisis con equipo especializado. Para esta prueba, la concentración objetivo con la cual se obtenía la mayor cantidad de puntos, fue de no más de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. [6] La distribución de puntos para esta prueba se puede ver en la figura 7.

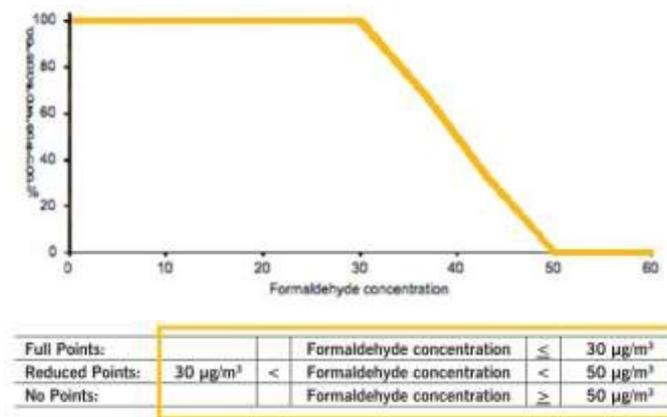


Fig. 7. Distribución de puntos para la prueba de VOC's.

Las ubicaciones para estos sensores fueron acordadas con los responsables del monitoreo en la villa solar y pueden verse en el anexo 1 (ubicación de los sensores para el monitoreo en la villa solar).

2.3.1.1.5 *Iluminación Natural*

Uno de los factores importantes que involucra un diseño arquitectónico adecuado es la iluminación natural ya que además de contribuir a las condiciones de confort está ligada directamente al consumo energético destinado a la iluminación artificial. Aunque en comparación con el consumo de algún electrodoméstico, la iluminación artificial puede no parecer muy relevante ya que actualmente se ha promovido el uso de lámparas fluorescentes compactas, o de tecnología LED, las cuales tienen un consumo menor que las tradicionales incandescentes y por lo tanto se tiene un ahorro energético pero en términos anuales es significativo, sobre todo si se compara una vivienda con un diseño arquitectónico adecuado en la cual disminuyen las horas al día de uso de energía eléctrica destinada a la iluminación.

Esta prueba consiste en colocar fotómetros en alguna habitación de la casa donde se medirá la intensidad luminosa del lugar de acuerdo con los niveles espectrales definidos por la organización, a una altura de 0.9 m y a una distancia mínima de 2 m de la ventana. Los puntos obtenidos en esta prueba se relacionan directamente con el factor de luz de día, el cual es un cociente del nivel de iluminación interior dividido entre el exterior, considerando éste último directo e indirecto. La distribución de puntos de esta prueba se muestra en la figura 8.

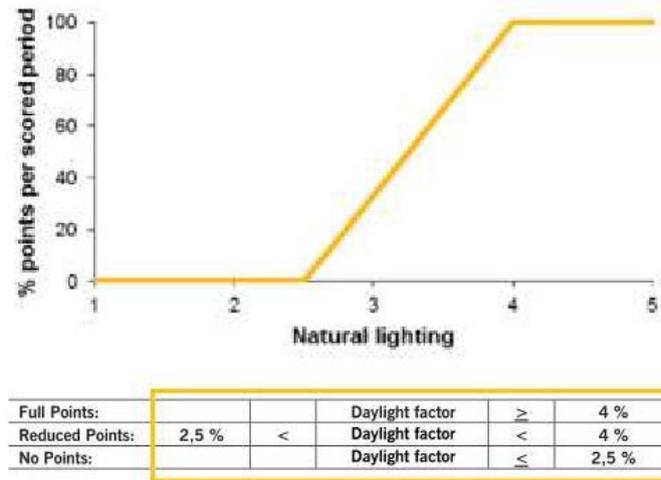


Fig. 8. Distribución de puntos para la prueba de iluminación natural.

2.3.1.1.6 Desempeño Acústico

Teniendo en cuenta el hecho de que esta edición europea fomenta que los prototipos propuestos brinden soluciones no solo como una vivienda individual sino como parte de un vecindario, cada equipo debe tener presente el hecho de aislar acústicamente el prototipo de dicho vecindario. Este aislamiento toma en cuenta todos los sonidos humanos del rededor y fuentes de ruido con el fin de no perturbar los espacios de adentro hacia afuera y viceversa, dotando de privacidad a cada habitación del prototipo de vivienda.

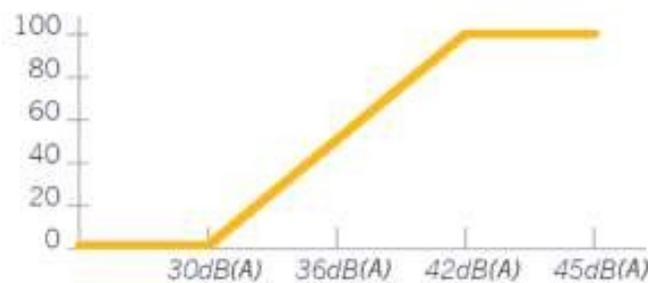
Aunque esto no puede ser medido directamente en el evento durante los días de competencia, debe estar incluido y justificado en el reporte referente al diseño arquitectónico.

El desempeño acústico que será evaluado en el sitio se divide en tres pruebas puntuales.

2.3.1.1.6.1 Aislamiento Acústico

La medición del aislamiento acústico fue realizada de acuerdo con el método propuesto en la ISO 140-5:1998 [7], en donde dicho aislamiento es medido según los decibeles medidos al interior del recinto y comparados con los medidos al exterior en donde se encuentra la fuente emisora, en este caso una bocina que reproducía ruido según lo indica la norma,. Los parámetros de valoración para dicha medición fueron calculados de acuerdo con la ISO 717-1 [8].

Con base en estos parámetros, la totalidad de puntos disponibles fueron otorgados al final de las mediciones acústicas a los prototipos cuyos valores acústicos fueron iguales o menores a 42 dB y puntos reducidos si dichos valores se encontraban entre 30dB y 42dB. La distribución de puntos para esta prueba puede verse en la figura 9.



Full Points:			Acoustic values	\geq	42 dB
Reduced Points:	30 dB	<	Acoustic values	<	42 dB
No Points:			Acoustic values	\leq	30 dB

Fig. 9. Distribución de puntos para la prueba de aislamiento acústico.

2.3.1.1.6.2 Tiempo de Reverberación

El tiempo de reverberación se define como el tiempo necesario para que la intensidad de un sonido disminuya a la millonésima parte de su valor inicial, lo que equivale a que disminuya 60 decibeles de su valor inicial, o se desvanezca después de que cese la fuente de sonido. [9]

El tiempo de reverberación fue medido en la sala de la vivienda considerando el mobiliario, de acuerdo con la ISO 3382-2:2004 [10]. La totalidad de puntos fue otorgada a los equipos cuyo prototipo obtuvo un tiempo igual o menor a 0.8 segundos y puntos reducidos si el tiempo se encontraba entre 0.8 y 1.2 segundos. La figura 10 muestra la distribución de puntos para esta prueba.

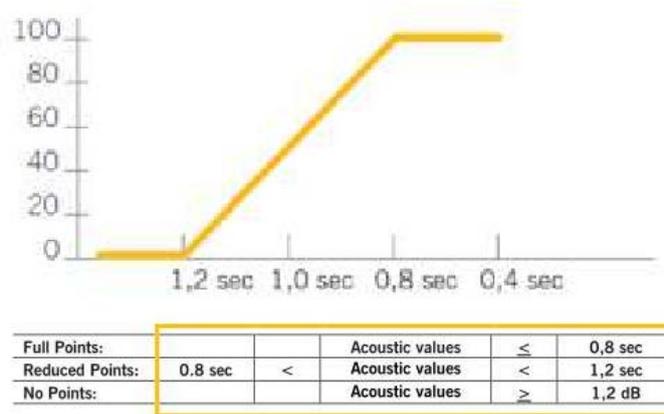


Fig. 10. Distribución de puntos para la prueba del tiempo de reverberación.

2.3.1.1.6.3 Nivel de Ruido de los Sistemas Activos

La última medición fue relacionada al nivel de ruido generado por el sistema de aire acondicionado y sistemas activos de la casa en la recámara de acuerdo con la ISO 10052:2004 [11]. Las mediciones del nivel de ruido se llevaron a cabo durante las condiciones más demandantes para asegurar un confort en el interior de la habitación de descanso. Estas mediciones debían ser realizadas con todos los equipos en operación, por ejemplo el deshumidificador y un flujo de aire máximo enfocados a obtener ciertas condiciones de confort. El objetivo principal de estas mediciones fue asegurar que no se excedieran los niveles de ruido producidos por los sistemas activos a cambio de condiciones de temperatura, humedad o calidad del aire confortables.

La totalidad de puntos otorgados al final de las mediciones de niveles de ruido fue otorgada a los equipos cuyos prototipos obtuvieran un valor igual o menor a 25dB y puntos reducidos fueron otorgados si dicho valor se encontraba entre 25dB y 35dB. La distribución de puntos para esta prueba se puede ver en la figura 11.

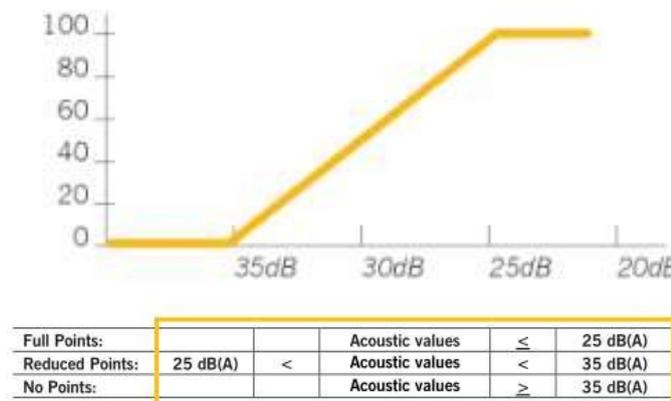


Fig. 11. Distribución de puntos para la prueba de niveles de ruido de sistemas activos y HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning systems).

2.3.1.2 *Funcionamiento de la Casa*

El objetivo principal de esta prueba es evaluar la funcionalidad y eficiencia del prototipo y sus electrodomésticos, al someterlo a pruebas de rendimiento en un escenario lo más real posible. Esta prueba intenta reproducir la demanda energética promedio de uso de una casa moderna y medir el desempeño de todos los electrodomésticos, equipos, sistemas y servicios utilizados a diario.

Existen diferentes tipos de mediciones involucradas en esta prueba, las cuales se dividen de la siguiente forma:

Puntuación por desempeño monitoreado:

- Refrigeración
- Congelación

Puntuación por tareas realizadas:

- Lavado de ropa
- Secado de ropa
- Lavavajillas
- Horno
- Tomas de agua caliente
- Cocinado
- Entretenimiento

Puntuación de los invitados:

- Cena

Lectura directa:

- Consumo de agua

2.3.1.2.1 *Refrigeración*

El refrigerador es sin duda uno de los electrodomésticos más utilizados a diario y que ha cambiado la vida de todos nosotros. En esta prueba fue sometido a un escenario de condiciones reales durante el cual fue monitoreada su temperatura mediante un termopar situado al interior del mismo. Con el fin de simular un uso real del

refrigerador la organización proveyó una carga de agua a temperatura ambiente que fue cambiada según un escenario determinado. Además, el refrigerador fue utilizado para guardar toda la comida y bebidas que fueron utilizadas durante la prueba de la cena y tenía que cumplir con una capacidad mínima de 170 litros.

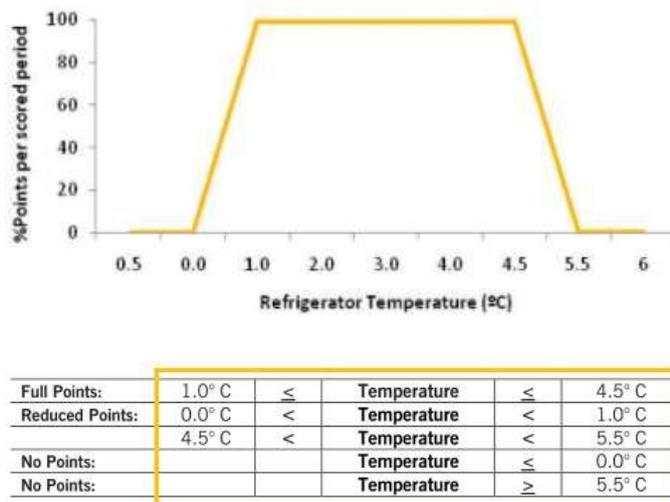


Fig. 12. Distribución de puntos para la prueba de refrigeración.

2.3.1.2.2 Congelación

Con el fin de tener unas condiciones lo más cercanas a la realidad, la organización proveyó de una carga de agua a temperatura ambiente que fue cambiada de acuerdo a un escenario determinado. De igual forma que con el refrigerador, para obtener información relacionada con la temperatura del mismo la organización colocó un termopar en el interior y así se pudo monitorear la temperatura del congelador. Adicionalmente, el congelador debía ser utilizado para almacenar la comida y bebidas que así lo ameritaran durante la prueba de la cena.

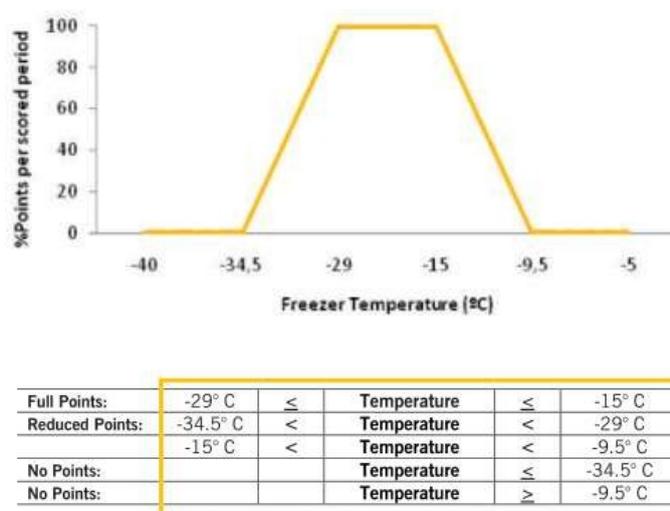
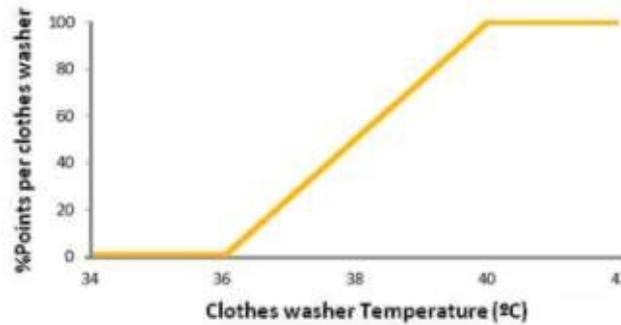


Fig. 13. Distribución de puntos para la prueba de congelación.

2.3.1.2.3 Lavado de Ropa

En esta prueba, todos los puntos disponibles son obtenidos si se acciona la lavadora durante uno o más de un ciclo ininterrumpido y normal de lavado dentro de un determinado período de tiempo, en el cual un sensor de temperatura colocado dentro deberá medir un valor de 40° C en algún punto del ciclo, donde dicho sensor monitoreará constantemente durante el ciclo de lavado.

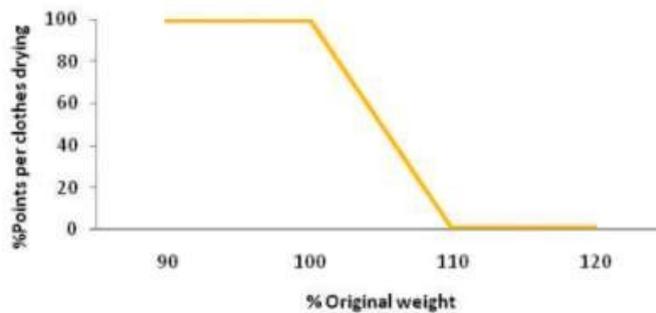


Full Points:	40° C	≤	Temperature		
Reduced Points:	36° C	<	Temperature	<	40° C
No Points:			Temperature	≤	36° C

Fig. 14. Distribución de puntos para la prueba de lavado de ropa.

2.3.1.2.4 Secado de Ropa

Esta prueba fue evaluada mediante una carga de lavandería, definida por seis toallas de baño pequeñas, las cuales tras ser sometidas a la prueba de lavado tuvieron que ser secadas y la forma de medir que tan secas se encontraban fue mediante su peso, que fue comparado una vez terminado el tiempo de secado con el peso antes de iniciar dicho ciclo.



Full Points:			Weight	≤	100%
Reduced Points:	100%	<	Weight	<	110%
No Points:			Weight	≤	110%

Fig. 15. Distribución de puntos para la prueba de secado de ropa.

2.3.1.2.5 Lavavajillas

En esta prueba se evaluó el desempeño del lavavajillas simulando condiciones reales de uso. El objetivo principal fue someter a este electrodoméstico a un ciclo completo e ininterrumpido de lavado normal durante un cierto intervalo de tiempo, durante el cual un sensor de temperatura fue colocado en su interior con el fin de obtener información de la temperatura del agua, siendo la temperatura objetivo para obtener la mayor cantidad de puntos 49° C durante algún momento del ciclo.

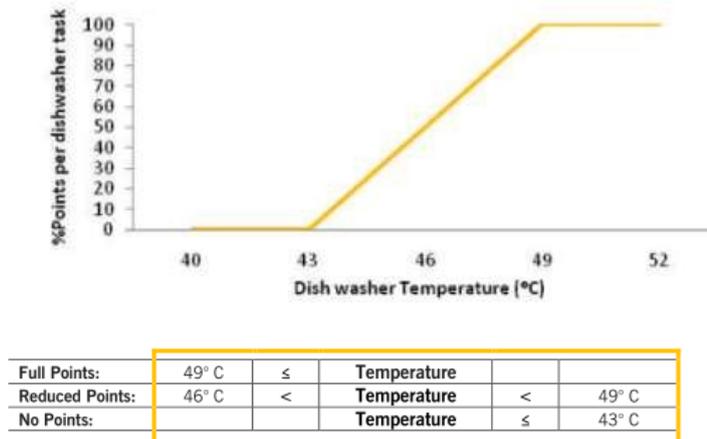


Fig. 16. Distribución de puntos para la prueba del lavavajillas.

2.3.1.2.6 Horno

Para la prueba del horno se evalúa la temperatura del mismo durante un período de tiempo, lo cual simula un uso apegado a la realidad y se ve reflejado en un consumo energético apegado a un consumo real de cualquier casa promedio. Mediante un sensor en el interior del horno se obtuvo información de su temperatura y así, se pudo evaluar.

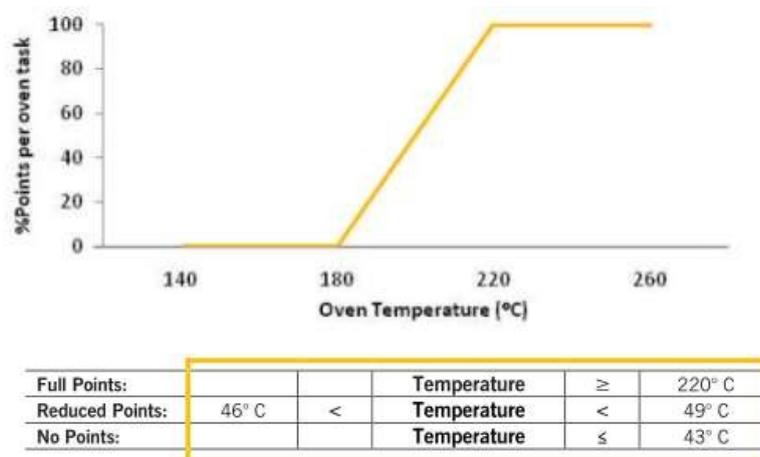


Fig. 17. Distribución de puntos para la prueba del horno.

2.3.1.2.7 Tomas de agua caliente

En esta prueba fue evaluada la capacidad de proveer agua caliente en las tomas de la casa, donde se tenían que obtener al menos 50 litros de agua caliente en 10 minutos para posteriormente medir su temperatura y de acuerdo con ésta obtener un determinado puntaje.

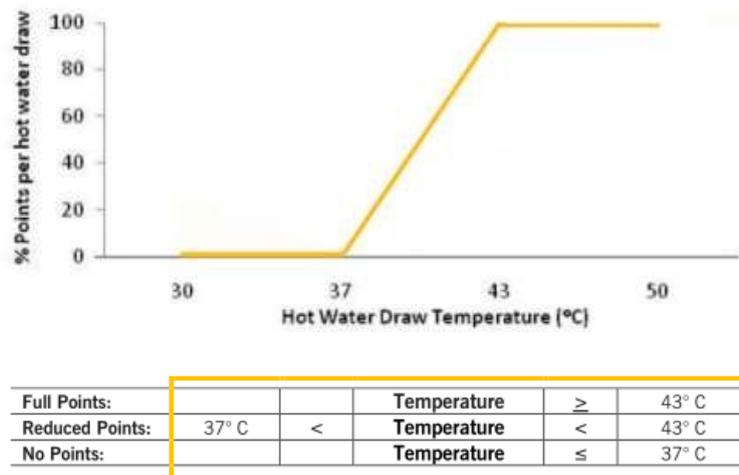


Fig. 18. Distribución de puntos para la prueba de tomas de agua caliente.

2.3.1.2.8 Cocinado

El objetivo de esta prueba fue evaluar el desempeño de la parrilla al evaporar 2.3 Kg de agua en un determinado período de tiempo con el fin de aproximar su uso a uno en condiciones reales.

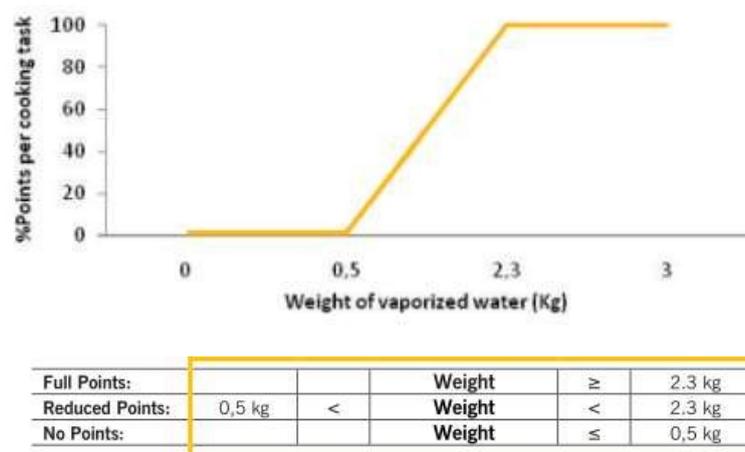


Fig. 19. Distribución de puntos para la prueba de cocinado.

2.3.1.2.9 *Entretenimiento*

El objetivo principal de esta prueba fue generar un consumo cercano al de una casa promedio considerando aparatos electrónicos como la computadora, la televisión, el reproductor de vídeo y el sistema de sonido durante un período determinado.

Con el objetivo de que todos los prototipos de vivienda compartieran condiciones similares, se restringieron las dimensiones y condiciones de operación de cada equipo electrónico mencionado anteriormente siendo una televisión de 27 pulgadas mínimo, un display de la computadora de 17 pulgadas o más, pudiendo ser laptop o de escritorio e independiente del vídeo de la televisión, desactivando toda función de stand by con el fin de simular un uso real, la televisión y monitor debían ser configurados al 75% de su brillo máximo.

2.3.1.2.10 *Cena*

Cada equipo debía de ser anfitrión de tres cenas durante la semana de competencia. Las cenas consistieron en invitar un par de miembros de decatletas de las casas vecinas, los cuales asignaron una puntuación para el equipo anfitrión después de cada cena. En dicha cena se evaluó la calidad de la comida, la atmósfera y la experiencia en general. Con respecto a la preparación de la cena, los ingredientes tenían que ser frescos y almacenados en el refrigerador o congelador según fuera el caso, donde dicha cena debía tener al menos un plato caliente.

2.3.1.2.11 *Consumo de agua.*

Para completar un escenario real del funcionamiento de la casa, la administración del agua tuvo un papel importante durante el evento. El consumo de agua de las casas fue medido durante la semana de competencia y en cuanto a la asignación de puntos se tomaron dos lecturas, la primera al inicio de la fase de competencia y la segunda al final, el equipo que tenga el menor consumo de agua obtendrá la mayor cantidad de puntos.

3 CASA UNAM

3.1 *Equipo*

Este equipo multidisciplinario nació en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México, en donde un pequeño grupo de estudiantes de forjó una idea inicial, la cual fue suficiente para solidificar una propuesta integral que fue inscrita en el evento internacional de vivienda sustentable Decatlón Solar Europa 2014. Tras haber librado con éxito diversas entregas y filtros, atravesó una última donde fue seleccionada como finalista de entre 65 universidades de todo el mundo.

Una vez siendo finalista y sabiendo que se necesitaría un equipo multidisciplinario, se incorporaron facultades e institutos al recién creado proyecto, entre las cuales están la Facultad de Ingeniería, la Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, la Escuela Nacional de Trabajo Social y la Escuela Nacional de Artes Plásticas, de donde alumnos y académicos en conjunto con patrocinadores trabajaron en conjunto para desarrollar una propuesta sustentable e innovadora con la que se satisfagan las necesidades del caso de estudio así como los rubros especificados por la organización del decaatlón solar a través de un documento que incluye un reglamento y documentación necesaria para garantizar una competencia justa y la maduración satisfactoria de todos los prototipos de vivienda sustentable que participaron.

3.2 Propuesta General

La propuesta de este equipo multidisciplinario parte de un análisis amplio en donde se abordan distintas carencias, dificultades y necesidades de la Ciudad de México y área metropolitana, las cuales son: falta de suministro adecuado de agua, altos tiempos de traslado y mala movilidad, autoconstrucción, escasos o ineficientes electrodomésticos y deficiencia en las instalaciones eléctricas, entre otros.

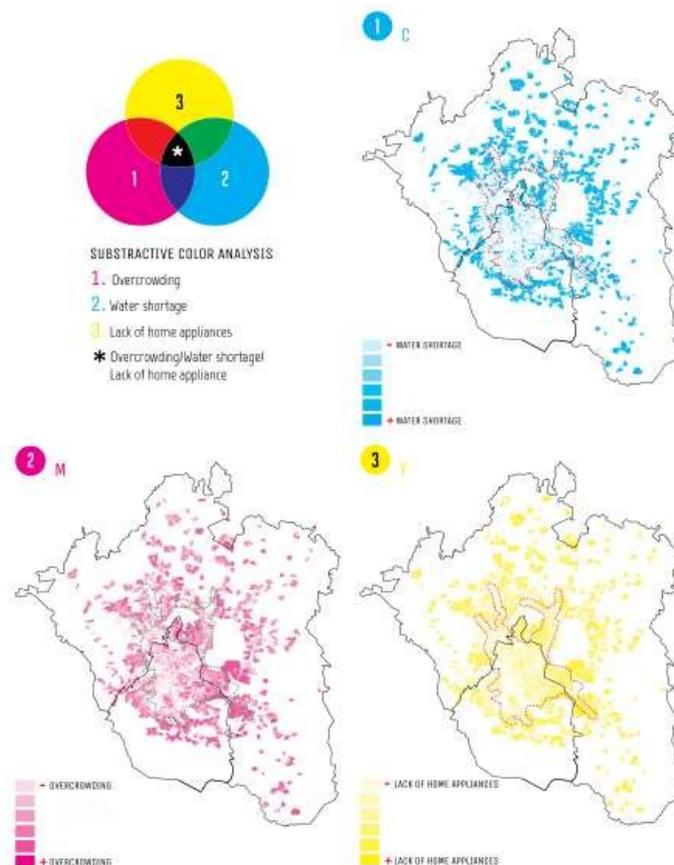


Fig. 20. Mapas de distribución de las tres mayores problemáticas (1.- Sobrepoblación, 2.-Escasés de agua y 3.- Falta de electrodomésticos). [12]

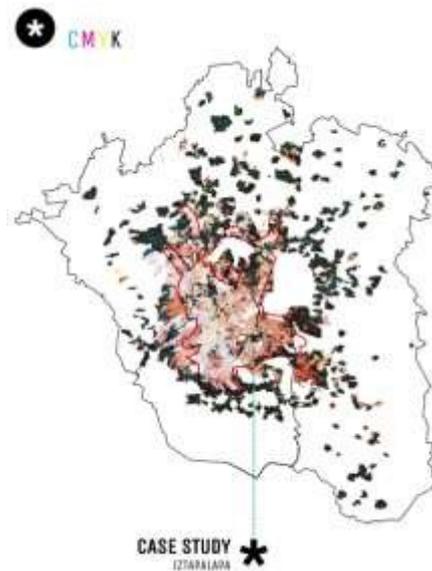


Fig. 21. Convergencia de las problemáticas analizadas para el caso de estudio. [12]

Uno de los impactos más grandes es la sobrepoblación y está estrechamente relacionada con las otras dos dificultades anteriormente mencionadas. El equipo desarrolló una serie de ideas para compensar el alto impacto que ha tenido la sobrepoblación en la Ciudad de México llegando a una solución versátil y adaptable con la cual se abordan esta serie de problemas que han venido afectando de sobremanera a la población desde hace varios años.

Esta solución se centra en aprovechar los espacios residuales sobre las azoteas de la ciudad, con lo cual se logra por un lado, ahorrar tiempo de traslado ya que al encontrarse más cerca que estando a las afueras de la ciudad se reducirían los viajes al día y por lo tanto las emisiones de contaminantes producto de la combustión y, por el otro lado se evita la autoconstrucción, la cual ha prosperado durante muchos años a causa del aprovechamiento del espacio hacia arriba, el cual es más económico.

Con esto, se ha desarrollado más que una casa, un sistema constructivo, el cual tiene cuatro enfoques:

- **Interurbano.** Al densificar el ambiente ya construido, disminuir el costo de los predios y reducir la distancia de las personas y sus actividades.
- **Resiliencia.** Adquirir la capacidad de sobrepasar situaciones adversas sin afectar permanentemente o deformar su entorno.
- **Regenerativo.** Transformar el lugar de implementación en un lugar saludable, diverso y abundante en recursos, encaminado hacia una mejoría en la calidad de vida.
- **Simbiótico.** Establecer relaciones de beneficio y dependencia mutua.

Todo el desarrollo anterior se llevó a cabo dentro del marco establecido por la organización del Decatlón Solar 2014 y simultáneamente para resolver las problemáticas mencionadas de nuestro caso de estudio, la unidad habitacional Vicente Guerrero en la delegación Iztapalapa de la Ciudad de México.



Fig. 22. Integración del prototipo a la unidad habitacional Vicente Guerrero. [12]

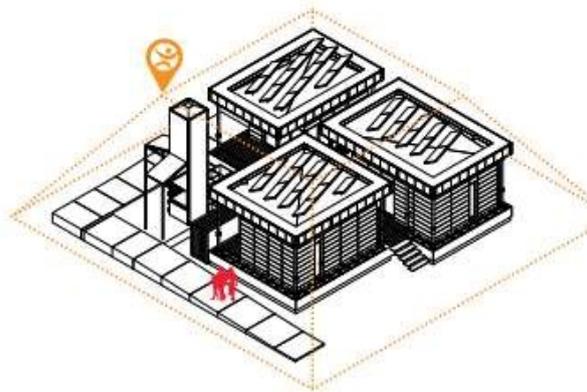


Fig. 23. Adecuación del prototipo a las limitaciones del Decatlón Solar. [12]

3.3 Prototipo

El proyecto CASA UNAM busca ofrecer una variedad de herramientas al usuario con el fin de tener la flexibilidad de adaptarse a sus necesidades particulares y está estructurado con base en sus principales componentes.

1.- Sistema estructural modular y liviano con interfaces de anclaje para adaptarse a las diversas condiciones para cimentar.



Fig. 24. Sistema estructural de piso y techo.

2.- Techos aislados y paneles con veladuras prefabricadas y ventanas móviles para flexibilidad de espacios.



Fig. 25. Sistema de ventanas y techos.

3.- Módulos de muebles, gran variedad de espacios de trabajo y de almacenamiento, todos construidos bajo la misma estructura modular.



Fig. 26. Mobiliario modular.

4.- Centros de servicio prefabricados que incluyen la cocina y el baño.

5.- Cuartos técnicos articulados con módulos prefabricados de servicios y consistentes espacialmente con el resto del sistema CASA.



Fig. 27. Banca técnica.

6.- Cubierta externa integrada con paneles fotovoltaicos, sistema de recolección y almacenaje de agua.



Fig. 28. Sistema de captación pluvial.

7.- Sistema textil con tres capas de distintos textiles con la función de recolección de agua, gotero perimetral y capa protectora contra la radiación solar y aislante de humedad.



Fig. 29. Sistema de textiles.

8.- Sistemas vivos con huertos comestibles, cubiertas vegetales y sistema de humedales para el tratamiento de aguas grises.



Fig. 30. Sistema de humedales y huertos comestibles.

9.- Torre de agua y sistema hidráulico y de calentamiento de agua pasivos, la cual brinda de presión suficiente para los servicios así como agua caliente para los mismos.



Fig. 31. Torre de agua y calentadores solares de agua.

El proyecto CASA UNAM no sólo contempló las necesidades y dificultades que viven actualmente los habitantes de la Ciudad de México sino que su diseño también contempló los requerimientos y necesidades para participar en el Decatlón Solar Europa 2014, lo cual implicó incluir el diseño de sistemas relacionados al cumplimiento de las diez pruebas a las que el prototipo fue sometido.

Con esto, se diseñó una caja de herramientas con la que es posible adaptar esta propuesta constructiva a cualquier espacio residual, aprovecharlo y gracias a los sistemas antes mencionados, lograr una simbiosis entre el lugar previo y la vivienda recién incorporada al compartir los recursos aprovechados como la radiación solar para generar electricidad, calentar el agua y suministrar de agua de lluvia a la vecindad.

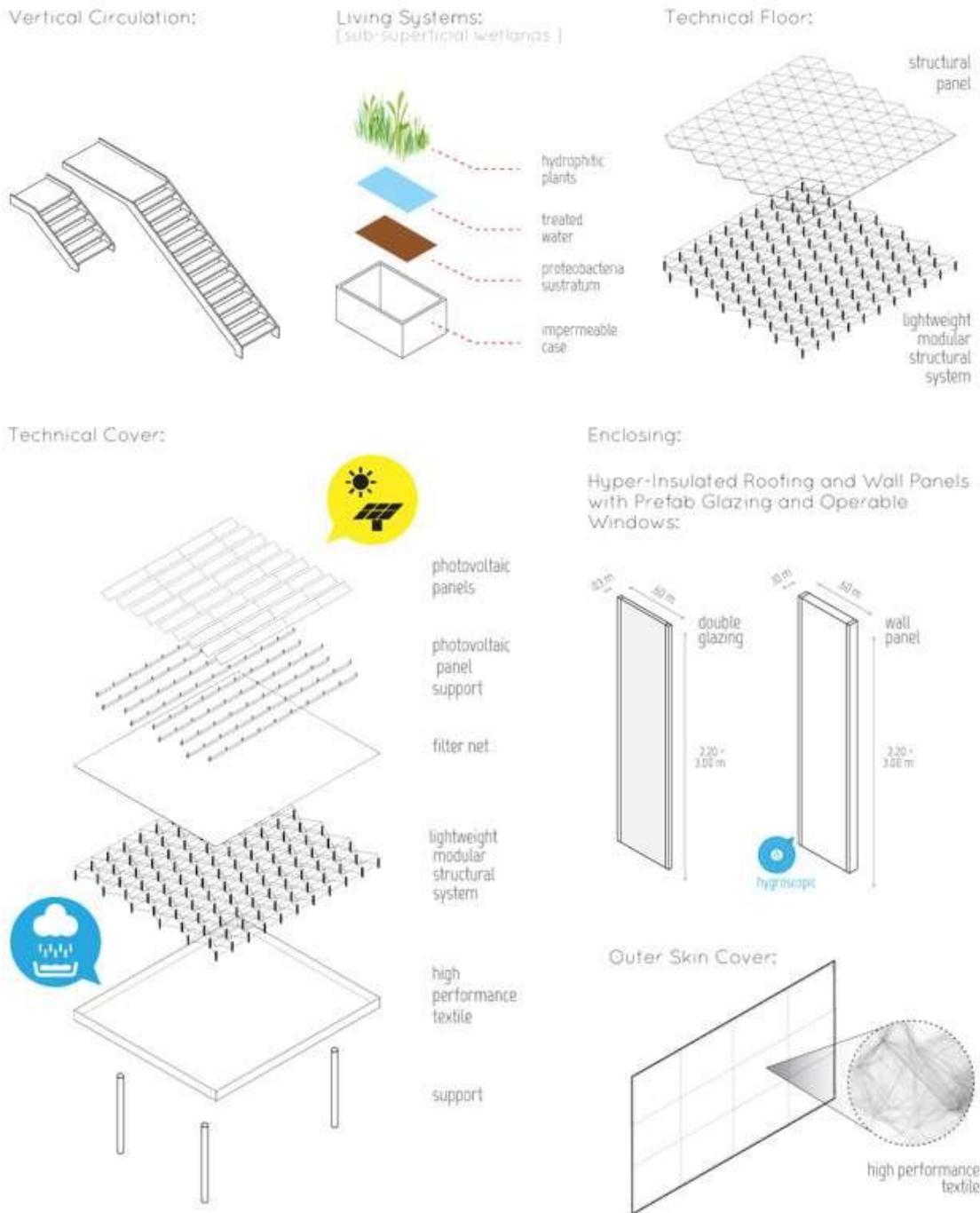


Fig. 32. Caja de herramientas del sistema constructivo [13]

Aplicando este el sistema constructivo se concretó una propuesta sólida para el prototipo de vivienda que se llevó a concursar a Francia. La planta de dicho prototipo puede verse en la figura 33.

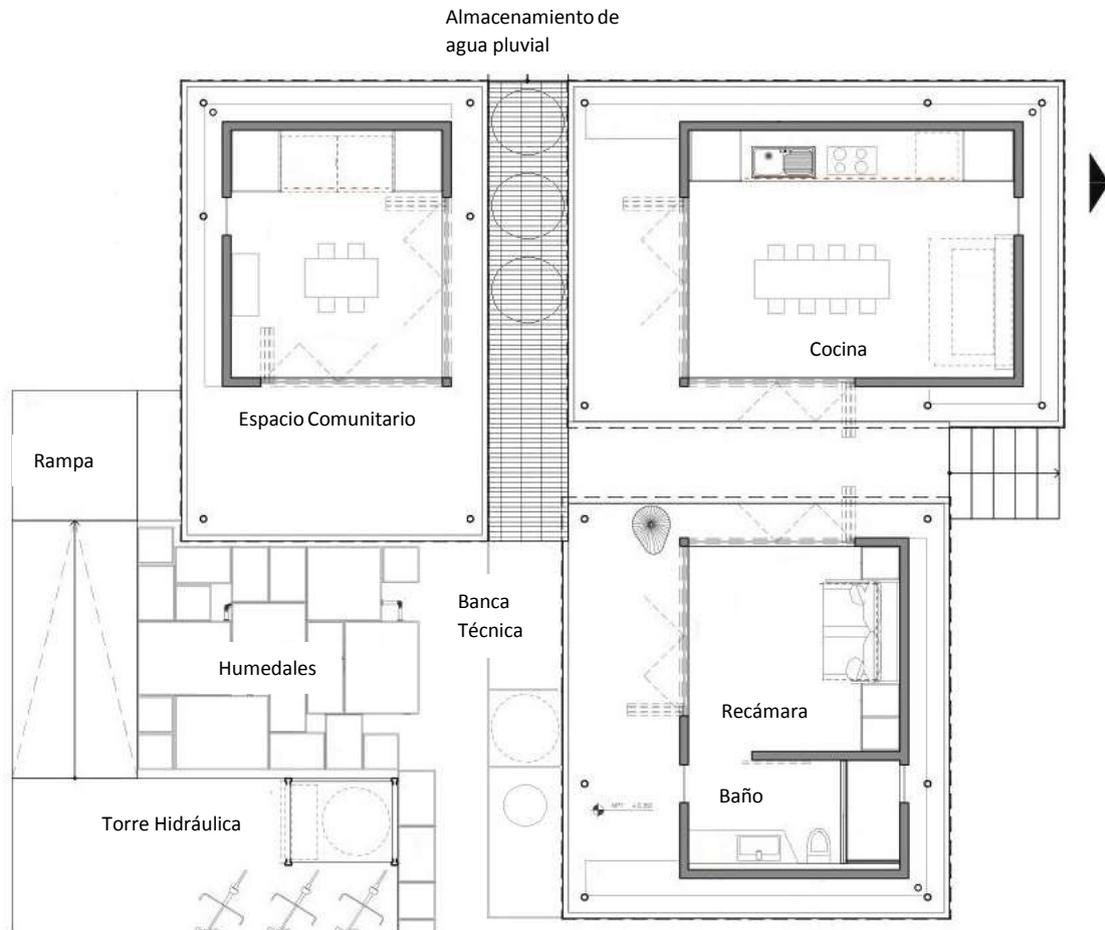


Fig. 33. Planta de la propuesta arquitectónica final.

Espacio Comunitario: Este espacio fue diseñado para ser un espacio multifuncional; funcionando como cuarto de lavado, cuarto de trabajo, espacio de juntas, etc.

Cocina: En este habitáculo se concentra la mayor parte de los electrodomésticos (refrigerador, lavavajillas, parrilla de inducción y horno eléctrico), junto con la tarja y servicios comunes de cualquier cocina. Cuenta con una mesa adaptable a la cantidad de comensales (4 - 10) y un escritorio que se convierte en cama para invitados.

Recámara: Este espacio es una combinación de sala y recámara dependiendo la necesidad ya que el sillón se puede convertir en cama al desplegarse ésta del mismo

Baño: Cuenta con una puerta corrediza y los servicios de cualquier baño de la ciudad.

Rampas: Para fines de visita y demostración se instalaron rampas de acceso para facilitar la entrada a personas con alguna discapacidad o de la tercera edad.

Humedales: Este sistema forma parte del sistema hidráulico y se encarga de limpiar y purificar el agua gris producida en la casa para su re-uso. Contiguo al mismo se encuentra el conjunto de hortalizas comestibles.

Torre Hidráulica: Es el corazón del sistema hidráulico, ya que ahí se concentran los tanques para almacenamiento de agua potable y agua gris, los cuales dotan de presión al sistema entero. Adicionalmente cuenta con dos colectores solares para el calentamiento

de agua potable ubicados hacia el sur y hacia el este de la torre. En la parte inferior cuenta con un sistema de bombas mecánicas que, al ser accionadas mediante una bicicleta durante cerca de 20 minutos, llenan los tanques superiores y así, se garantiza una presión y suministro constante de agua potable y gris hacia los humedales. Este sistema se puede apreciar en la figura 34.

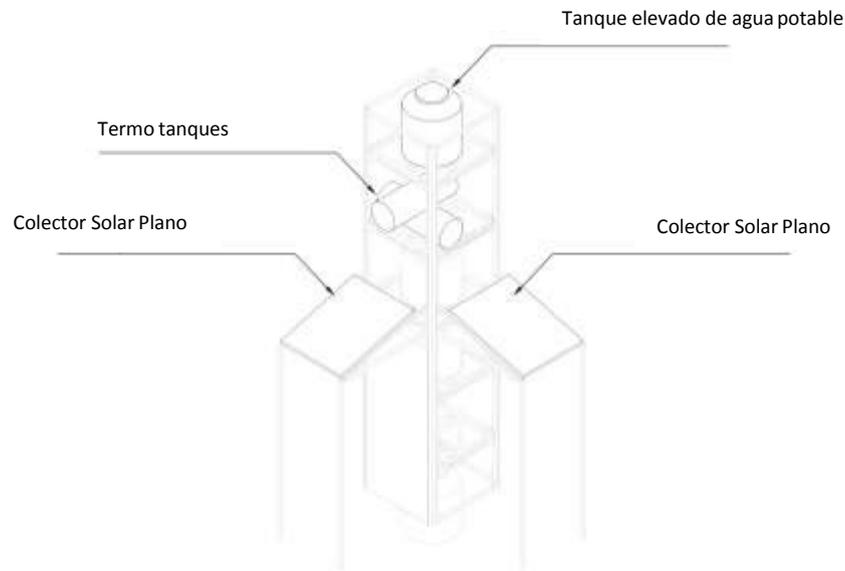


Fig. 34. Torre hidráulica. [12]

Almacenamiento de agua pluvial: Consta de un sistema de tanques conectados en paralelo que almacenan el agua de lluvia proveniente de los textiles de recolección.

Banca Técnica: Se encuentra dividida en tres secciones; la banca eléctrica, donde se encuentran los tableros eléctricos, el inversor, protecciones, interruptores y el sistema de control central; la banca hidráulica central, donde se ubicó un tanque para aguas negras; y la banca hidráulica secundaria, donde se encontraba el calentador eléctrico de respaldo, un tanque para almacenamiento de agua tratada, válvulas y derivaciones importantes.

4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO

4.1 Identificación del Problema

Con base en lo mostrado anteriormente, se comenzó un diseño orientado al usuario, que en este caso serían dos; uno virtual, una pareja joven de la Ciudad de México y por otro lado uno real; los capitanes de competencia del equipo CASA UNAM, quienes llevaron

a cabo las pruebas y tareas solicitadas por la organización durante la etapa de competencia.

Apegándose a las reglas y pruebas del Decatlón solar mencionadas en el capítulo segundo, una parte del equipo de ingeniería, del cual fui miembro y coordinador, se enfocó en analizar en qué formas se podía intervenir mediante sistemas de ingeniería los sistemas ya existentes o adicionarlos a la estructura de la casa con el fin de aportar medidas o acciones para obtener la mayor cantidad de puntos disponibles de las pruebas cuantificables, principalmente las Condiciones de Confort y un poco el Funcionamiento de la Casa. El objetivo fue diseñar un sistema autónomo que fuera capaz de brindar un desempeño adecuado durante dichas pruebas y así, ayudar a obtener la mayor cantidad de puntos en cada prueba.

Este sub equipo de ingeniería diseñó un sistema de control y monitoreo para garantizar las condiciones más cercanas a las solicitadas por la organización en materia de condiciones de confort, considerando las variables temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y VOC's, iluminación natural y desempeño acústico, se hizo un análisis de los sensores y sistemas activos necesarios para obtener niveles adecuados de los mismos. Dado que la iluminación natural y el desempeño acústico son pruebas puntuales se consideraron por separado del sistema central de monitoreo.

Cabe mencionar que durante la competencia únicamente se evaluaron dos de las tres habitaciones de la casa, sin embargo, se decidió incluir el tercer habitáculo para conocer el comportamiento de sus variables al tener dimensiones diferentes a los otros dos y así, contar con una instrumentación completa con fines de investigación en etapas futuras del proyecto.

Con respecto a la calidad del aire se hizo una investigación relacionada a la medición de contaminantes en la Ciudad de México, la cual es llevada a cabo por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México y genera un índice de contaminación del aire. Este valor corresponde al Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), el cual es medido en diversos puntos de la ciudad y monitorea seis variables atmosféricas: monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), partículas menores a 2.5 micrómetros y partículas menores a 10 micrómetros. Con base en sus concentraciones y, a través de fórmulas se calcula el IMECA, el cual es arrojado por el contaminante con mayor concentración promedio en un intervalo móvil de una hora.

Teniendo esto en cuenta se decidió adicionar sensores al sistema con el fin de conocer mejor la calidad del aire, dichos sensores fueron de monóxido de carbono y de ozono debido a su costo y tamaño.

4.2 *Identificación de las Necesidades*

Una vez conocido el problema, se clasificaron las necesidades por prueba o categoría de pruebas relacionadas y se distinguieron de las intervenciones o mejoras propuestas con el fin de tener un escenario básico y separarlo de uno sofisticado.

Necesidades para el escenario básico:

- Condiciones de Confort
 - Medición de variables de confort.
 - Procesamiento de las mediciones.
 - Comparación de las mediciones con valores objetivo.
 - Generación de señales de acción hacia los sistemas activos.
 - Sistemas activos capaces de regular las variables medidas.
 - Control automático de la iluminación interior y exterior.

- Funcionamiento de la Casa
 - Medición de niveles de agua.
 - Medición de temperatura del agua caliente.
 - *Control de flujos de agua*

Extras del escenario sofisticado:

- Condiciones de Confort
 - Despliegue de información generada.
 - Almacenamiento de datos.
 - Generación de gráficas y valores máximos.
 - Visualización en Internet.

- Funcionamiento de la Casa
 - Control de desbordamiento.
 - Indicadores y medición de nivel de agua.
 - Medición de flujos de agua.

- Sistema de Seguridad
 - Cámaras IP.
 - Control de accesos.
 - Alarmas de intrusión.
 - Alarma sísmica
 - Sistema de iluminación de emergencia

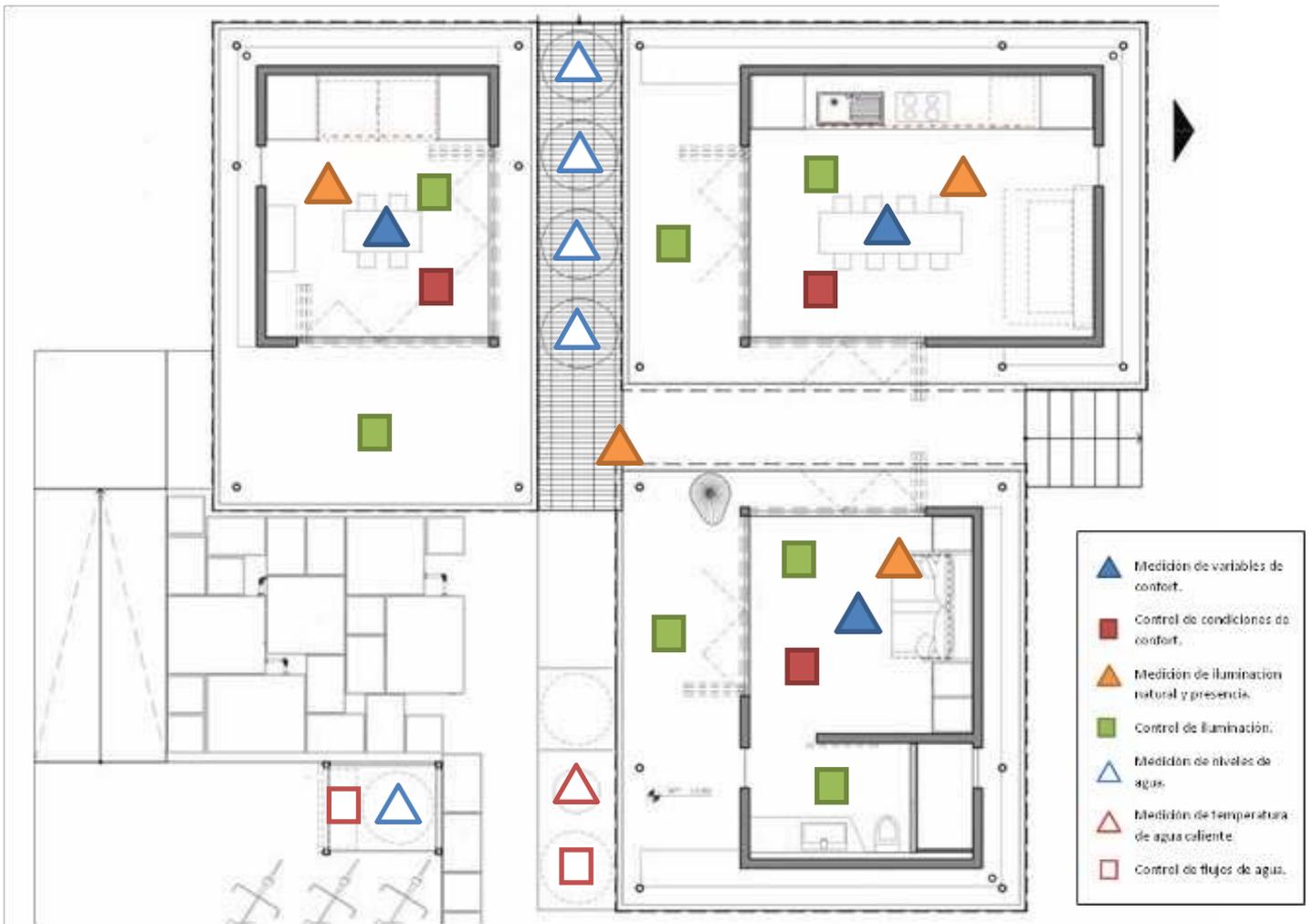


Fig. 35. Ubicación de las necesidades básicas para el sistema de control y monitoreo.

4.3 Alternativas de Solución

Una vez analizadas las necesidades, se hizo una interpretación de las mismas, lo que convirtió a cada una de ellas en un sistema o componente a investigar. A continuación se enlista esta interpretación:

- Medición de Variables de Confort.
 - Sensores de temperatura
 - Sensores de Humedad Relativa
 - Sensores de dióxido de carbono
 - Sensores de VOC's
 - Sensores de iluminación
 - Sensores de sonido
- Procesamiento (componente o sistema que permita procesar, comparar y generar señales)

- Comparadores de voltaje
- Microcontrolador
- Microcomputadora

- Sistemas Activos de Regulación de Variables Medidas
 - Sistema de Aire Acondicionado o ventilación
 - Humidificador / Deshumidificador

- Sistema de control de iluminación
 - Sensores de iluminación
 - Sensores de presencia
 - Control de iluminación (on-off/dimmers)

- Funcionamiento de la casa
 - Sensores de temperatura sumergibles
 - Electroválvulas
 - Caudalímetros

Una vez interpretadas las necesidades, se realizó una búsqueda de información con respecto a las soluciones existentes en el mercado para cada una de ellas con el fin de tener un abanico de soluciones y así poder escoger la más adecuada según nuestras necesidades.

En cuanto al sistema de control de iluminación y la parte inteligente de la casa, se consultaron distintas alternativas como el sistema “MY HOME” ofrecido por Bticino®, el cual ofrece un control integral del sistema de iluminación mediante el control de escenarios, sistema de cámaras en el acceso principal así como en el interior de la casa, un sistema de monitoreo de alarmas y un sistema de control de iluminación, sonido y temperatura de las habitaciones, lo cual englobaba muchas de las necesidades básicas y algunas de las sofisticadas.



Fig. 36. Sistema MY HOME de Bticino®. [14]

Otro sistema que se encuentra actualmente en el mercado es el que ofrece Lutron®, quien posee dimmers, sensores de presencia, de iluminación, interfaces inteligentes,

control inalámbrico de persianas, control de ventiladores, etc., todo enfocado al ahorro energético y con una familia de componentes de alta eficiencia.



Fig. 37. Sistema de control de Lutron ®. [15]

El último sistema que se analizó fue Clipsal ®, perteneciente a la marca Schneider Electric. Este sistema cuenta con sensores de presencia, de iluminación, de temperatura, dimmers y un control integral de iluminación.



Fig. 38. Sistema Clipsal ® de Schneider Electric. [16]

Hasta este punto quedaba pendiente un sistema de monitoreo de las variables de confort para cada habitáculo. Para lo cual se realizó un acercamiento con el Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México con el fin de tener nociones más claras de cómo se llevan a cabo las mediciones de gases realizadas por estos especialistas.

El instituto cuenta con diversas áreas de investigación como: Aerobiología, Contaminación Ambiental, Físicoquímica atmosférica, Espectroscopía y Percepción Remota, entre otras y un departamento de instrumentación meteorológica. Se tuvo contacto con el Ing. Wilfrido Gutiérrez y el Biol. Miguel Ángel Meneses, quienes

forman parte del departamento de instrumentación meteorológica, así como con el Dr. Michel Grutter y el Dr. Wolfgang Stremme, quienes pertenecen al área de Espectroscopía y Percepción Remota. Gracias a ellos se pudo conocer mejor la metodología que siguen y el equipo que utilizan.

El instituto forma parte de la RUOA (Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos), la cual cuenta con observatorios atmosféricos ubicados en distintos puntos del país como Alzomoni, Los Tuxtlas, Hermosillo, Juriquilla, Saltillo, Aguascalientes, Morelia, Chamela y el Instituto de Ciencias de la Atmósfera en Ciudad Universitaria.



Fig. 39. Plataforma de observación del Instituto de Ciencias de la Atmósfera. [17]

Esta plataforma está compuesta por instrumentos especializados para la medición de la calidad del aire, analizador de dióxido de carbono, metano y humedad, muestreadores de VOC's, muestreador de aeropartículas, perfilador de gases MAX-DOAS, entre otros.

Para nuestras necesidades, el analizador de CO₂, CO, CH₄ y humedad, así como el muestreador de VOC's y perfilador de gases MAX-DOAS parecían ser buenas alternativas.

El analizador de CO₂, CO, CH₄ y humedad es un PICARRO 2401 ®, que utiliza una tecnología de CRDS (Cavity Ring-Down Spectroscopy) la cual emplea una sofisticada medición basada en tiempo y utiliza un láser para cuantificar las propiedades espectrales de las moléculas en estado gaseoso dentro de una cavidad óptica.



Fig. 40. Analizador de gases PICARRO 2401. [18]

El perfilador de gases MAX-DOAS (Multi Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy) es un equipo especializado que utiliza un espectrómetro usb2000 de Ocean Optics para medir con base en diferentes ángulos, la concentración de gases en la atmósfera como NO₂, O₃ entre otros.



Fig. 41. Perfilador de gases MAX-DOAS de la UNAM. [19]

Gracias a esta visita al Instituto de Ciencias de la Atmósfera se pudo tener un acercamiento a los instrumentos que utilizan para llevar a cabo las mediciones de variables atmosféricas, sin embargo, son equipos e instrumentos bastante robustos y sofisticados para nuestras necesidades, además de ser muy costosos debido a su precisión y funciones específicas. Gracias a eso, se cayó en cuenta de que era necesario un equipo o sensores mucho más sencillos y de dimensiones más prácticas, lo cual implicaría un costo mucho menor, aunado al hecho de disminuir los costos si se desarrollaba un sistema al integrar múltiples componentes en vez de adquirir un equipo comercial.

Con lo anterior, se realizó una búsqueda de sensores para las variables de confort, la cual fue vertida en la siguiente tabla comparativa.

Variable Física	Modelo	Descripción y características	Proveedor	Precio	Imagen
Temperatura	TMP102	<p>Sensor de Temperatura</p> <p>12-bit, 0.0625°C de resolución Precisión de 0.5°C (-25°C a +85°C) Baja corriente en modo de inactividad 10µA en modo activo (máx.), 1µA inactivo (máx.) Alimentación de 1.4 a 3.6 VDC Interfaz de 2 cables (I2C)</p>	Robodacta	\$110	
Temperatura	TMP102	<p>Sensor de Temperatura</p> <p>12-bit, 0.0625°C de resolución Precisión de 0.5°C (-25°C a +85°C) Baja corriente en modo de inactividad 10µA en modo activo (máx.), 1µA inactivo (máx.) Alimentación de 1.4 a 3.6 VDC Interfaz de 2 cables (I2C)</p>	AG / Sparkfun	\$102	

CO ₂	MG-811	<p align="center">Sensor de Dióxido de Carbono</p> <p>Alimentación de 6VDC Rango de medición: 350 – 10000 ppm Umbral de detección ajustable Alta sensibilidad Interfaz de comunicación: Salida analógica de 0 a 2 V y salida digital TTL</p>	Holbein Labs	\$880	
VOC's	Yocto-VOC	<p align="center">Sensor de Compuestos Orgánicos Volátiles</p> <p>Rango de medición: 450 - 65000 ppm Consumo: 80 mA Alimentación de 5VDC</p>	Yoctopuce	\$194 USD	
VOC's	iAQ-2000	<p align="center">Sensor de Compuestos Orgánicos Volátiles</p> <p>Alta sensibilidad y respuesta rápida Rango de detección 450-2000 ppm Bajo consumo energético Alimentación de 5VDC Gran variedad de comunicaciones: TTL, RS232, SPI, I2C, PWM</p>	Co2meter	\$229 USD	
VOC's	Grove HCHO	<p align="center">Sensor de Compuestos Orgánicos Volátiles</p> <p>Alta sensibilidad a diversos compuestos Rango de detección 1 – 50 ppm Alimentación: 5VDC Interfaz de comunicación: Salida analógica de 0 a 5 V</p>	Seedstudio	\$15 USD	
CO	MQ-7	<p align="center">Sensor de Monóxido de Carbono</p> <p>Rango: 20 - 2000ppm. También responde a Hidrógeno (H₂). Tiempo de Respuesta rápido Umbral de detección ajustable Alta sensibilidad Interfaz de comunicación: Salida analógica de 0 a 2 V y salida digital TTL</p>	Holbein Labs	\$158	
Ozono	MQ-131	<p align="center">Sensor de Ozono</p> <p>Rango de medición: 10 – 10000 ppm Alimentación de 5VDC Umbral de detección ajustable Alta sensibilidad Interfaz de comunicación: Salida analógica de 0 a 2 V y salida digital TTL</p>	Holbein Labs	\$435	
Luz	TEMT6000	<p align="center">Sensor de Luz Ambiente</p> <p>Foto transistor con amplio ángulo de sensibilidad media ($\phi = \pm 60^\circ$) Alimentación de 5VDC Interfaz de comunicación: Salida analógica de 0 a 5 V</p>	Robodacta	\$80	
Luz	IM120710017	<p align="center">Módulo Sensor de Luz Ambiente</p> <p>Foto resistencia con amplificador y comparador. Alimentación: 5VDC Interfaz de comunicación: Salida analógica de 0 a 5 V y salida digital TTL.</p>	AG	\$40	

Sonido	BOB-09964	Micrófono con Circuito Amplificador Amplificador hasta 100x Alimentación de 2.7 a 5.5 VDC Interfaz de comunicación: Salida analógica de 0 a 5 V	AG/Sparkfun	\$129	
Sonido	IM120710013	Micrófono con Circuito Amplificador Amplificador hasta 100x Alimentación de 2.7 a 5.5 VDC Interfaz de comunicación: Salida analógica de 0 a 5 V	AG	\$33	

De la misma forma, se hizo un estudio sobre el componente para satisfacer la necesidad de procesar la información arrojada por el sensor, lo cual implicó que dicho componente debía tener entradas y salidas digitales, así como entradas analógicas e incluir interfaces de comunicación como I2C, RS232, SPI, etc., con el fin de garantizar una compatibilidad entre la unidad de procesamiento y casi cualquier dispositivo o sensor que se deseara conectar. A continuación se muestra una tabla comparativa para la unidad de procesamiento.

Marca	Modelo	Descripción y características	Proveedor	Precio	Imagen
Microchip	PIC 16F887	Microcontrolador Entradas / Salidas: digitales 36, entradas analógicas: 14 RAM:368 bytes ROM:256 bytes Puertos: SPI, I2C, UART Velocidad del reloj: Hasta 20MHz, interna 8MHz	AG	\$50	
Microchip	PIC 18F4550	Microcontrolador Entradas / Salidas: digitales 35, entradas analógicas: 14 RAM:2048 bytes ROM:256 bytes Puertos: SPI, I2C, UART, USB Velocidad del reloj: Hasta 48MHz, interna 8MHz	AG	\$100	
Arduino	UNO (Atmega328P)	Microcontrolador Entradas / Salidas: digitales 24, entradas analógicas: 6 RAM:2 kbytes ROM:1 kbyte Puertos: SPI, I2C, UART Velocidad del reloj: Hasta 20MHz, interna 8MHz	AG	\$300	
Arduino	Mega (Atmega2560)	Microcontrolador Entradas / Salidas: digitales 86, entradas analógicas: 16 RAM: 8 kb ROM: 4 kb Puertos: SPI, I2C, 4 USART Velocidad del reloj: Hasta 16MHz, interna 1-8MHz	AG	\$550	

Texas Instruments	MSP430G2 Launchpad	Microcontrolador Entradas / Salidas: digitales 10-20, entradas analógicas: 4-8 RAM: 512 bytes ROM: 4 kb Puertos: SPI, I2C, USART Velocidad del reloj: Hasta 16MHz	330Ohms	\$250	
Raspberry	Pi 1 Modelo A	Microcomputadora Entradas / Salidas: digitales 17, entradas analógicas: 8 vía un MCP3008 RAM: 256Mb CPU: ARM1176JZF-S a 700MHz Puertos: SPI, I2C, USB Sistema Operativo: Linux	AG	\$950	
BeagleBone	Black	Microcomputadora Entradas / Salidas: digitales 46, entradas analógicas: 7 RAM: 512Mb CPU: ARM Cortex A8 Sitara a 1GHz Puertos: SPI, I2C, USB, Ethernet Sistema Operativo: Linux / Android	AG	\$1300	

4.4 Evaluación y Selección de Alternativas

- Sistema de ventilación y aire acondicionado

Antes de iniciar dicho proceso de búsqueda de información, se tuvo una reunión con las principales áreas del equipo, tanto de ingeniería (coordinación, fotovoltaico, eléctrico, hidráulico, monitoreo y control, estructural y térmico), así como de arquitectura (coordinación, paisaje, interiores, mobiliario, muros, etc.) con el fin de valorar la viabilidad e integración de los sistemas analizados por cada equipo de ingeniería y así, todo el equipo estar al tanto de dichos sistemas y sus implicaciones en cuanto a instalaciones e impacto en el prototipo final.

Cabe destacar que la elección de los sistemas y componentes deberían seguir la filosofía de tener un sistema lo más pasivo, un usuario lo más activo posible y equipos económicos y de alta eficiencia energética, con el fin de tener una casa interactiva y un máximo ahorro energético. Por otro lado, debido a que fue un proyecto académico y se contó con recursos limitados, uno de los ejes principales sobre los cuales giró la búsqueda de componentes fue el lograr conseguir un acuerdo de colaboración de tipo patrocinio con la empresa que brindara dicho producto o sistema, o en su defecto conseguir el de menor costo y de preferencia de origen mexicano. Con estas limitaciones y enfoques, se continuó la búsqueda de sistemas y componentes para satisfacer las necesidades pendientes del proyecto.

Se determinó que la elección del sistema de ventilación y calefacción recaía sobre el equipo que llevó a cabo el análisis térmico de la casa, quienes determinaron que un ventilador de recuperación de energía o ERV (Energy Recovery Ventilator) por sus siglas en inglés sería la mejor alternativa. En la sección 4.5 del presente trabajo se

muestran algunas especificaciones de este equipo, para más información con respecto al análisis térmico y selección de este componente se puede consultar el trabajo titulado “Diseño de Instalaciones de ACS Solar y Climatización de CASA-UNAM” por el M.I. Rodolfo Vilchis Martínez [20]. Con lo anterior, fue resuelto el sistema de ventilación, calefacción y humidificación de la casa.

- Sistema de Control de Iluminación

Siguiendo la filosofía del proyecto, la propuesta de Bticino ® fue descartada debido a que se salía del presupuesto y se requerían planos terminados, los cuales se encontraban en etapa de diseño. La propuesta del sistema de Lutron ® fue igualmente descartada debido a ser altamente costosa e implicaba tener el prototipo terminado. Sin embargo, tras analizar la oferta de Schneider Electric nos percatamos que sus productos satisfacían no sólo las necesidades del sistema de control de iluminación, sino también gran parte del sistema eléctrico y fotovoltaico, con lo que se decidió buscar un patrocinio de dicha empresa. Schneider Electric al ser patrocinador general del evento, le abrió las puertas al proyecto CASA UNAM y se consolidó como uno de los patrocinadores más importantes del proyecto al brindar una solución al sistema de control de iluminación, protecciones y tableros para el sistema eléctrico, así como gabinetes y el inversor para el sistema fotovoltaico por mencionar algunos.

- Sistema de Medición de Variables de Confort

Una vez analizadas las posibles alternativas de solución para las necesidades del sistema de medición y monitoreo, se eligieron los siguientes componentes:

- Sensor de Temperatura: LM35
- Sensor de Humedad Relativa: HIH-4030
- Sensor de Dióxido de Carbono: MG-811
- Sensor de VOC's: Grove HCHO
- Sensor de luz ambiente: IM120710017
- Sensor de sonido: IM120710013

En cuanto este sistema, al ser AG el principal proveedor de componentes, se buscó una colaboración de tipo patrocinio, aunque no tuvo éxito. Por otro lado, para los sensores de dióxido de carbono, que fueron los más costosos, se logró obtener un patrocinio por parte de la empresa Holbein Labs. Esta empresa fue fundada en la ciudad de México por egresados del Instituto Politécnico Nacional y actualmente se encuentra en Hong Kong con un distribuidor en el norte de la ciudad de México. Adicionalmente, se integraron sensores de monóxido de carbono y de ozono, ambos de Holbein Labs, con el fin de conocer el comportamiento de estas variables dentro del prototipo.

Cabe mencionar que con base en la NOM-020-SSA1-1993 [21], la concentración de ozono máxima permisible en interiores es de 0.11ppm o 110ppb por una hora y 11ppm por 8 horas de monóxido de carbono de acuerdo a la NOM-021-SSA1-1993 [22].

- Sistema de Procesamiento

Esta parte tal vez sea la más importante del sistema de medición y monitoreo ya que se encarga de convertir las señales generadas por los sensores en acciones de control o en información ya sea enviada, desplegada o almacenada.

En cuanto a la selección de este componente o sistema, se descartaron las microcomputadoras debido a su alto costo y falta de familiaridad con su lenguaje de programación, dejando la elección entre los microcontroladores seleccionados, de los cuales se eligieron los PICs (Periferal Interface Controller) de Microchip, por su precio, disponibilidad y familiaridad con su lenguaje de programación. Adicionalmente, la empresa patrocinadora de los sensores, Holbein Labs, también proporcionó los microcontroladores necesarios de la familia 16F884, los cuales son muy parecidos al 16F887 en cuanto a características comparadas, haciéndolo perfectamente elegible entre las alternativas de solución.

4.5 *Especificaciones*

- Sistema de Medición de Variables de Confort
 - Sensor de Temperatura LM35

Este sensor tiene la ventaja de estar calibrado directamente en grados Celsius y cuenta con una precisión de 0.5 °C a 25 °C, tiene un rango de operación de -55 °C a 150 °C y se alimenta de 4 V_{DC} a 30 V_{DC}.



Fig. 42. Sensor de temperatura LM35. [23]

- Sensor de Humedad HIH-4030

Posee una salida casi lineal en relación de milivolts al porcentaje de humedad relativa, precisión mejorada, tiempo rápido de respuesta y resistente a químicos. Alimentación de 4 V_{DC} a 5.8 V_{DC}, rango de operación recomendado de 0 °C a 50 °C con una respuesta adecuada de 0 % a 100 % de humedad relativa.



Fig. 43. Sensor de humedad relativa HIH-4030. [24]

- Módulo de detección de VOC's Grove HCHO

Este módulo contiene el sensor WSP2110 del fabricante Winsen que es sensible a diferentes compuestos orgánicos volátiles, entre los cuales se encuentran: alcohol, tolueno, benceno y metanal. Se alimenta con 5 V_{DC} y opera en un rango de 1 a 50 ppm.



Fig. 44. Módulo de VOC's con el sensor WSP2110. [25]

- Módulo de detección de CO₂

Este módulo está compuesto por un detector de CO₂ de la marca Winsen, modelo MG-811. En su circuito impreso contiene un amplificador operacional LM393 en configuración de comparador y un 3140MZ en configuración de amplificador, además de los componentes necesarios para ambas tareas. Se alimenta con 6 V_{DC}, opera entre -20 ° C y 50 ° C, tiene una terminal de salida digital y una analógica, y detecta de 350 ppm a 10,000 ppm.



Fig. 45. Módulo de CO₂ con el sensor MG-811. [26]

- Módulo de detección de CO

Este módulo está compuesto por un detector de CO de la marca Winsen, modelo MQ-7. En su circuito impreso contiene un amplificador operacional LM393 en configuración de comparador, además de los componentes necesarios para dicha comparación. Se alimenta con 5 V_{DC}, opera entre -20 ° C y 50 ° C, tiene una terminal de salida digital y una analógica, y detecta de 20 ppm a 20,000 ppm.



Fig. 46. Módulo de CO con el sensor MQ-7. [27]

- Módulo de detección de O₃

Este módulo está compuesto por un detector de O₃ de la marca Winsen, modelo MQ-131. En su circuito impreso contiene un amplificador operacional LM393 en configuración de comparador, además de los componentes necesarios para dicha comparación. Se alimenta con 5 V_{DC}, opera entre -20 ° C y 50 ° C, tiene una terminal de salida digital y una analógica, y detecta de 5 ppb a 100 ppm.



Fig. 47. Módulo detector de O₃ con el sensor MQ-131. [28]

- Unidad de procesamiento

Como se mencionó anteriormente, se seleccionó el microcontrolador PIC 16F884 como unidad de procesamiento, el cual llevará a cabo las funciones de comunicación, conversión, control y procesamiento en general. Este microcontrolador posee 40 pines, de los cuales se pueden utilizar hasta 36 como entradas o salidas, de los cuales 13 pueden ser configurados como entradas analógicas. Tiene un convertidor analógico-digital de 10 bits e interfaces de comunicación SPI, I²C y UART Trabaja a una frecuencia máxima de 20 MHz con un oscilador o cristal externo y hasta 8 MHz con el oscilador interno. Cuenta con 256 bytes de memoria RAM y 256 bytes de memoria EEPROM.



Fig. 48. Microcontrolador PIC 16F884 de Microchip. [29]

- Sistema de Control de Iluminación

Con el objetivo de garantizar un correcto funcionamiento del sistema, se analizaron los componentes seleccionados hasta el momento así como el sistema de control de iluminación Clipsal, de Schneider Electric, que se detalla a continuación.

Clipsal es una marca de origen Australiano fundada en 1920 y adquirida por Schneider Electric en 2004. Actualmente cuenta con una amplia oferta en los sectores de accesorios eléctricos, iluminación, aplicaciones industriales, redes, sistemas integrales, manejo de cables y salud. [30]

El sistema de control de iluminación de Clipsal es un conjunto de componentes de entrada, como sensores de presencia, de iluminación, botoneras o acopladores de bus, y

de salida como dimmers o relevadores, que en conjunto brindan control automático o manual de iluminación o cargas conectadas como motores, ventiladores, indicadores o cualquier sistema o componente compatible con un control ya sea ON/OFF o de regulación tipo dimmer.

Una de las peculiaridades de este sistema es su comunicación alámbrica, la cual maneja un protocolo propio mediante un bus de datos denominado C-Bus, el cual utiliza una terminal positiva y negativa de alimentación para cada componente y posee la ventaja de ser flexible en cuanto al tipo de topología de red, teniendo la capacidad de conectarse en bus, estrella, árbol, mixta o cadena Daisy, todas con el uso de un terminador de bus.

Para nuestras necesidades se seleccionaron los siguientes componentes:

- Sensores de presencia, para controlar automáticamente la luminaria según haya o no gente en cada habitación.



Fig. 49. Sensor de presencia. [31]

- Sensor de iluminación interior, para brindar parámetros de decisión al encender automáticamente la luminaria considerando los niveles de iluminación natural.



Fig. 50. Sensor de iluminación interior. [32]

- Sensor de iluminación exterior, para controlar automáticamente la luminaria exterior según la radiación del sol.



Fig. 51. Sensor de iluminación exterior. [33]

- Sensor de temperatura, con el fin de tener un segundo parámetro de medición para las condiciones de confort y como sistema secundario de control de ventilación.



Fig. 52. Sensor de temperatura. [34]

- Teclado Saturn, control manual sobre la luminaria, ventilación o cargas.



Fig. 53. Teclado Saturn. [35]

- Banco de Dimmers, para brindar la posibilidad de regular la intensidad luminosa de cada luminaria por separado o por escenas.



Fig. 54. Banco de dimmers de 4 canales. [36]

- Banco de relevadores, con el fin de tener control ON/OFF sobre cierta luminaria como la exterior, los ventiladores, el calentador eléctrico de respaldo para agua caliente o cualquier otra carga a controlar.



Fig. 55. Banco de relevadores de 4 canales. [37]

- Acopladores de Bus, como interfaz entre componentes externos a Clipsal y el mismo mediante un contacto seco entre cualquier terminal y su común.



Fig. 56. Acopladores de Bus de 4 canales. [38]

- Wiser Home Control, el cual se comunica inalámbricamente con dispositivos inteligentes como tablets o smartphones con la finalidad de tener control manual sobre los dimmers y relevadores.



Fig. 57. Wiser Home Control. [39]

- Interfaz PC-USB, con la cual se configuró el sistema desde el software C-Bus Toolkit.



Fig. 58. Interfaz PC-USB. [40]

- Pascal Automation Controller, el cual es un controlador orientado a iluminación y se apega a una programación de días y horarios.



Fig. 59. Pascal Automation Controller. [41]

- Sistema de Ventilación / Aire Acondicionado

Con la preocupación de tener una fuente de aire fresco y al mismo tiempo una reducción en el consumo de energía para esta tarea, el sistema de recuperación de energía aire-a-aire parece ser una solución clave para generar un ahorro energético. Este sistema, también conocido como ventilador de recuperación de energía o recuperador de calor, es un sistema mecánico que remueve el aire contaminado del interior de espacios

habitables y lo reemplaza con aire fresco del exterior. Adicionalmente, el sistema involucra un proceso de recuperación de energía (calor y/o masa) de un flujo de alta temperatura hacia uno de baja temperatura a través de un intercambiador de calor para mantener una temperatura agradable en el interior. En otras palabras, dentro de este sistema, la energía que sería perdida es utilizada para calentar el aire en el flujo frío, lo cual ayuda a recuperar parte de la energía perdida. [42]



Fig. 60. Interior de un Ventilador de Recuperación de Energía. [43]

Gracias a este componente se regularon las variables de confort de temperatura, humedad y calidad del aire con un bajo consumo de energía. Particularmente, se empleó un ERV de la marca Panasonic modelo FV-04VE1, el cual puede proporcionar hasta 40 CFM (68 m³/h) de aire al interior del recinto consumiendo 24 W de electricidad a 110 V_{CA}.

- Sistema auxiliar de calentamiento de agua

Como se mencionó el segundo capítulo de este trabajo, para las pruebas del funcionamiento de la casa se evaluó el desempeño de los electrodomésticos al someterlos a pruebas diarias que representaron un escenario de uso real de los mismos, para los cuales un suministro de agua caliente fue indispensable.

Como se muestra en el tercer capítulo, la torre hidráulica cuenta con una instalación de colectores solares para el calentamiento pasivo de agua mediante el aprovechamiento de la radiación solar, sin embargo, con el fin de tener un plan alternativo en caso de no contar con las condiciones meteorológicas más favorables, el equipo de ingeniería encargado del análisis térmico del prototipo, aparte de seleccionar el sistema de ventilación y los calentadores solares de agua, se dieron a la tarea de seleccionar un sistema de respaldo para el calentamiento de agua. Dado que dentro de los lineamientos de la competencia no es posible utilizar combustibles fósiles, se seleccionó un calentador eléctrico de respaldo para un suministro alternativo de agua caliente hacia los electrodomésticos así como para la toma de agua caliente de la cocina y del baño.

Con base en el análisis realizado de los requerimientos para el prototipo, como consumo de agua, temperatura y capacidad, se seleccionó el calentador eléctrico de la marca Rheem modelo 89VP15S.



Fig. 61. Calentador eléctrico de respaldo. [44]

4.6 Diseño de Integración del Sistema

- Sistema de Monitoreo y Control de Variables de Confort

Una vez seleccionados los componentes que mejor satisficieran las necesidades ajustándose a la filosofía y limitaciones del proyecto, fue necesario integrarlos de una forma en la que se garantizara un correcto funcionamiento como sistema. Para dicha integración fue necesario analizar la forma en la que podía interactuar cada componente para un correcto flujo de información y por lo tanto, un funcionamiento adecuado del sistema. En la figura 62 se muestra un diagrama con los flujos de información para las condiciones de confort de cocina.

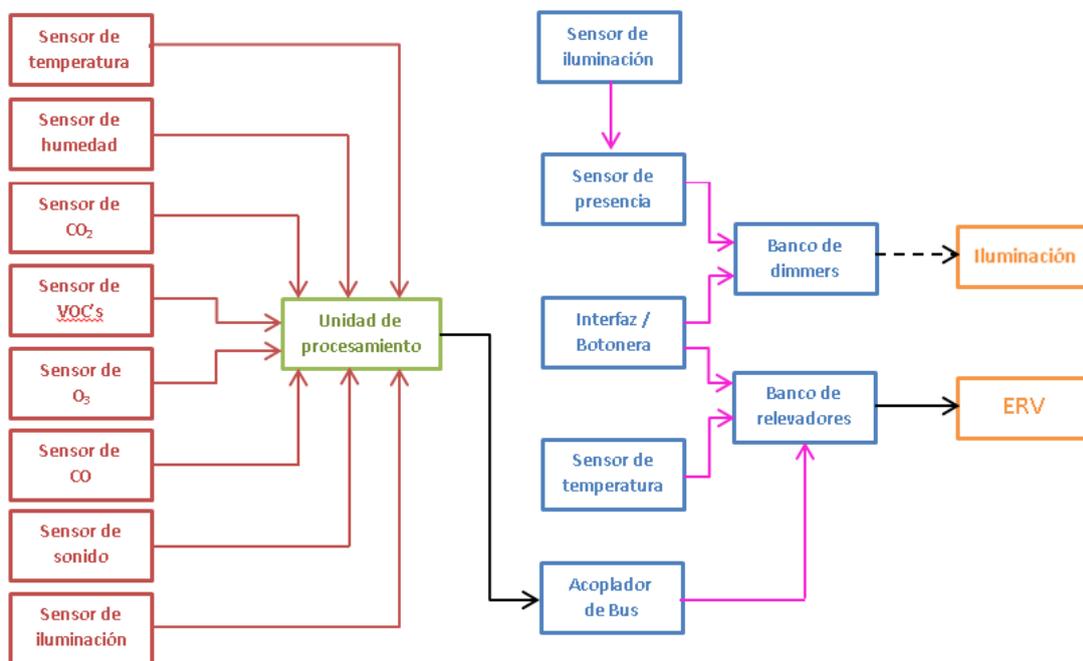


Fig. 62. Diagrama de bloques para los componentes de la cocina.

Donde los bloques rojos representan los sensores de variables de confort; el verde, la unidad de procesamiento; los azules, los componentes de Clipsal y en anaranjado, las

cargas a controlar. Las líneas de color rojo representan señales analógicas de los sensores hacia la unidad de procesamiento; las de color negro, una señal de control ON/OFF; las de color rosa, el bus de comunicación C-Bus de Clipsal y la línea punteada, una señal modulada para controla la intensidad de iluminación.

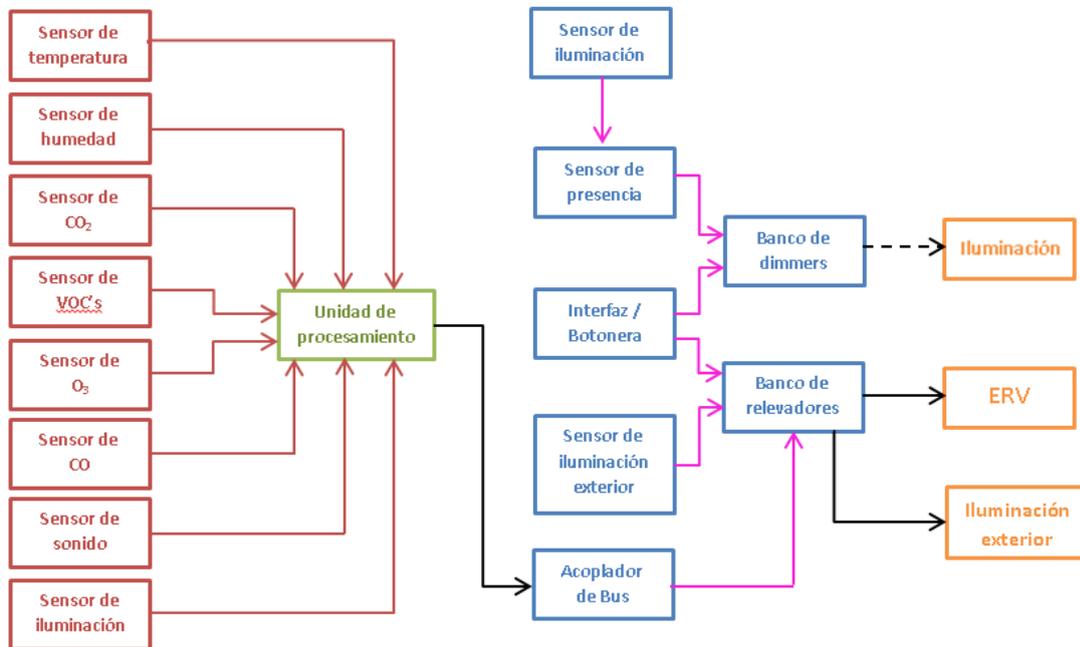


Fig. 63. Diagrama de bloques para los componentes del espacio comunitario.

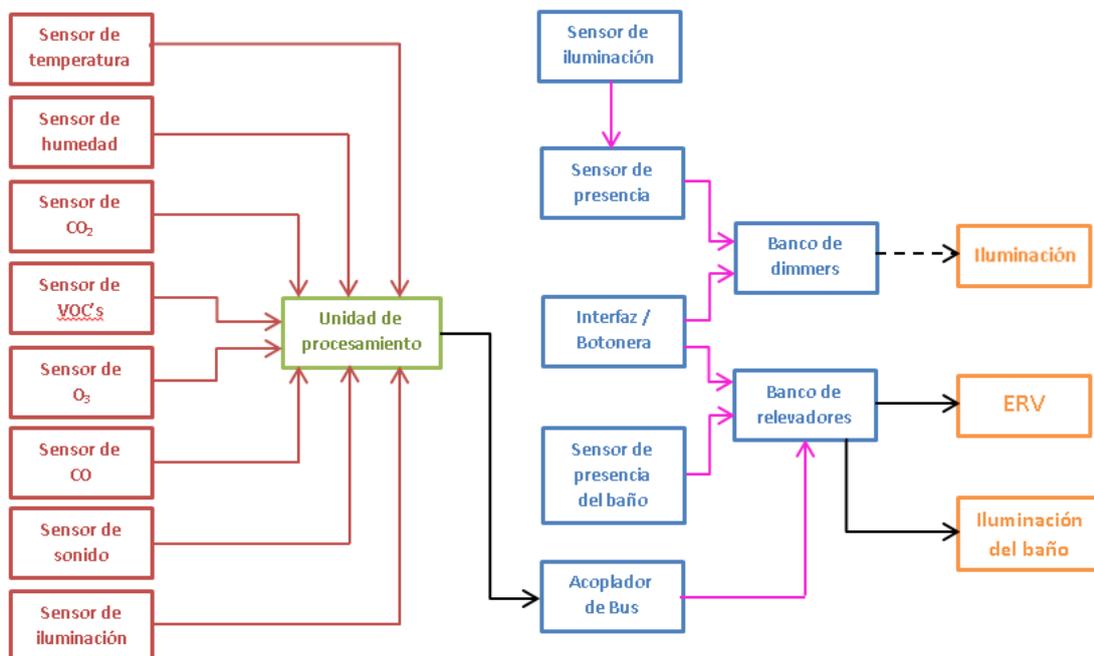


Fig. 64. Diagrama de bloques para los componentes de la recámara y baño.

Con esta distribución se tenía cubierta la etapa de control de las variables de confort, sin embargo, restaban componentes por ubicar como el amplificador de audio o la interfaz

inalámbrica Wiser. El hacer este ejercicio de diseño nos llevó a darnos cuenta de elementos faltantes al poner a prueba lo diseñado hasta el momento y comprobar si en efecto podía interactuar como se había propuesto. Analizando a detalle la hoja de especificaciones del acoplador de bus, se observó que la señal de entrada que detecta es mediante un contacto seco, lo que significa cortocircuitar sin voltaje de por medio en el circuito, alguna de sus cuatro terminales de entrada con su respectiva terminal común. En la figura 65 se muestra un ejemplo de contacto seco mediante un relevador.

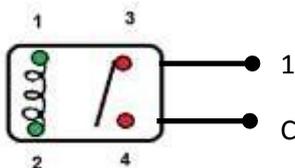


Fig. 65. Ejemplo de contacto seco mediante un relevador que cierra el circuito de las terminales 1 y C.
[45]

El detalle más importante descubierto en la hoja de datos fue que la longitud del punto 3 o 4 de la figura anterior hasta el acoplador de bus no debía exceder los 50 cm, lo cual llevó a un replanteamiento de la comunicación entre la unidad de procesamiento y el acoplador de bus. Dado que se habían contemplado más de una variable para las entradas del acoplador, como los sensores de nivel, fue necesario ubicarlos en un punto central para comunicar dichas señales de entrada. El lugar seleccionado fue la banca técnica, en donde se ubicó el tablero principal de control, el cual concentra los bancos de relevadores, dimmers, fuente para el C-Bus, la interfaz de programación y el controlador PASCAL. Dada la centralidad de la banca técnica, se integró de igual forma la interfaz inalámbrica Wiser y el amplificador de audio se ubicó en la recámara, al contar con el sistema de audio y vídeo en ese habitáculo. En el anexo 2 (ubicación de los componentes de Clipsal y cargas) se muestra la ubicación final de los componentes del sistema de control de iluminación y los dispositivos a controlar.

- Sistema de Comunicación

Con base en lo analizado hasta el momento, fue necesario incorporar un sistema de comunicación entre las unidades de procesamiento ubicadas en los habitáculos y los acopladores de bus en la banca técnica, para lo cual se realizó un análisis sobre las posibles soluciones y sistemas disponibles para dicha tarea. Se analizaron soluciones alámbricas como RS232 o RS485 e inalámbricas como WiFi, Bluetooth y RF (radiofrecuencia). Fueron descartadas las alternativas alámbricas dado que implican una instalación especial de ductos y cables, estos últimos debidamente aislados de interferencias electromagnéticas para garantizar una adecuada comunicación, por lo que el sistema de comunicación se enfocó en una solución inalámbrica.

Cabe remarcar que el Ing. Carlos Canchola llevó a cabo esta parte del proyecto y dado a que contaba con experiencia en la comunicación a través de RF, seleccionó este método de comunicación inalámbrica. Particularmente, se seleccionó el transceptor Xbee PRO

2, el cual es un transmisor y receptor de radio frecuencia. En la figura 66 se muestra uno de los módulos de radiofrecuencia seleccionados.

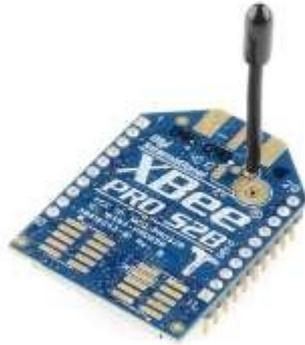


Fig. 66. Transceptor Xbee PRO S2B. [46]

Estos módulos de comunicación tienen la ventaja de contar con un microcontrolador integrado, lo que implica disponer de entradas y salidas digitales, además de entradas analógicas, lo cual sustituyó a la unidad de procesamiento, sin embargo fue necesario implementar dos módulos por habitáculo debido a que cuentan únicamente con cuatro entradas analógicas. En total se contemplaron siete módulos, dos para cada habitáculo y un coordinador en la banca técnica.

- Sistema de Instrumentación y Control del Calentador Eléctrico de Respaldo

Como se menciona anteriormente, fue necesario garantizar un suministro constante de agua caliente durante las pruebas del funcionamiento de la casa, derivando en una necesidad de medir la temperatura de la misma y de controlar el funcionamiento del calentador eléctrico de respaldo en caso de ser necesario.

Con base en esto, se realizó una búsqueda de sensores de temperatura que tuvieran la cualidad de ser sumergibles, de los cuales se encontraron pocas alternativas, entre las que destacó un termopar de tipo k y un sensor sumergible con punta metálica. De las opciones encontradas, se descartó el termopar debido a su costo y fue elegido el sensor sumergible con punta metálica. Dicho sensor es manufacturado por la compañía Dallas Semiconductor, el modelo fue el ds18b20 y se muestra en la figura 67.



Fig. 67. Sensor de temperatura sumergible ds18b20. [47]

Este sensor trabaja entre -55°C y 125°C , posee tres terminales de conexión; la amarilla, que se conecta al bus 1-Wire, la negra que se conecta a 0V y la roja, que se conecta a una fuente externa de 3.0V a 5.5V, sin embargo puede conectarse en modo de alimentación parasitaria. En la figura 68 se muestra un ejemplo de estas conexiones.

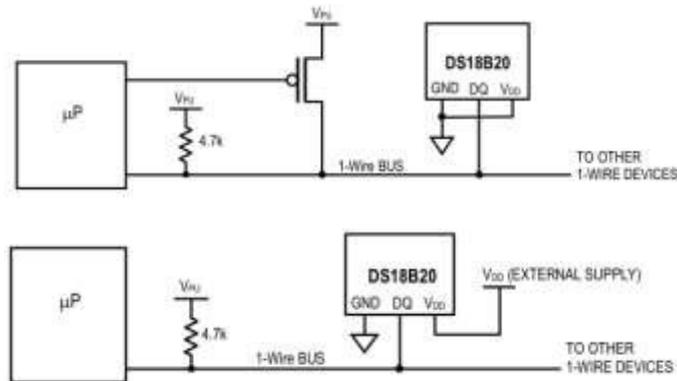


Fig. 68. Alimentación de tipo parasitaria (arriba) y con fuente externa (abajo). [48]

Este sensor cuenta con un registro de temperatura de 16 bits donde almacena el valor de la temperatura medida como se muestra en la figura 69.

	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
LS BYTE	2^3	2^2	2^1	2^0	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}
	BIT 15	BIT 14	BIT 13	BIT 12	BIT 11	BIT 10	BIT 9	BIT 8
MS BYTE	S	S	S	S	S	2^6	2^5	2^4

S = SIGN

Fig. 69. Registro de almacenamiento del sensor de temperatura ds18b20. [48]

Como se menciona anteriormente, este sensor utiliza un protocolo de comunicación llamado 1-Wire, el cual utiliza un solo cable para conectarse a un bus al cual pueden incorporarse más sensores de este tipo o cualquier otro que posea dicha interfaz de comunicación. Dicho protocolo, utiliza un solo pin con una resistencia de pull-up conectada al pin de alimentación, es bidireccional, half-duplex, tiene versatilidad para conectar un maestro y múltiples esclavos, cuenta con una velocidad estándar de transmisión de 15.4 kbps y una de 125 kbps en modo de sobremarcha, cada dispositivo posee un registro de fábrica de 64 bits de identificación única. Para nuestra aplicación se escogió la configuración de alimentación externa y un único sensor de temperatura. Para más detalles relacionados con la comunicación a través de este protocolo o funcionamiento del sensor se pueden consultar las referencias al final de este trabajo. [49]

Finalmente, se analizó el funcionamiento del calentador eléctrico de respaldo así como sus conexiones eléctricas e hidráulicas con el fin de entender las necesidades implicadas en su control.

El calentador eléctrico de respaldo cuenta con un depósito de agua de 15 gal o 57 l, en el que se ubica una resistencia eléctrica en el interior. Para controlar internamente el

encendido de dicha resistencia, este calentador posee un termostato similar al de los calentadores convencionales de gas. Con lo que aparentemente podía controlarse este componente mediante la interrupción de la fase de alimentación (127 V_{AC}) por medio de un relevador del sistema Clipsal. Sin embargo, fue necesario analizar la instalación hidráulica para determinar componentes adicionales a requerir con el fin de asegurar un funcionamiento adecuado de este componente para brindar un flujo de agua caliente en caso de que los colectores solares no pudieran abastecerla.

Al analizar la instalación hidráulica nos percatamos que el calentador eléctrico de respaldo se encontraba conectado en serie con el termo-tanque de los colectores solares, por lo que un sistema de selección de flujos fue necesario.

De igual forma que en un calentador convencional de gas, el calentador eléctrico tiene una entrada y una salida de agua, las cuales tuvieron que ser intervenidas con el fin de tener un control de los flujos y así evitar vaciar el depósito del calentador eléctrico si se contaba con una temperatura suficiente a la salida de los colectores solares.

La forma seleccionada para controlar dichos flujos fue por medio de electroválvulas, las cuales servirían como by-pass antes de la entrada al calentador eléctrico, desviando el agua caliente proveniente de los tanques de los colectores solares directamente hacia las tomas, si ésta contaba con una temperatura objetivo de 65°C. Esta temperatura fue seleccionada por el equipo de análisis térmico del prototipo considerando las pérdidas en el trayecto hasta las tomas.

La electroválvula seleccionada para esta aplicación fue de la marca AquaTech, modelo ROB-10456, la cual trabaja a 12 V_{DC} y tiene un diámetro de ¾ de pulgada. La figura 70 muestra dicha electroválvula.



Fig. 70. Electroválvula seleccionada para el control de flujos. [50]

Finalmente, para asegurar un flujo adecuado alrededor del calentador eléctrico, se contemplaron tres electroválvulas para poder controlar adecuadamente el flujo proveniente de los colectores solares. La figura 71 muestra la instalación propuesta de las electroválvulas.

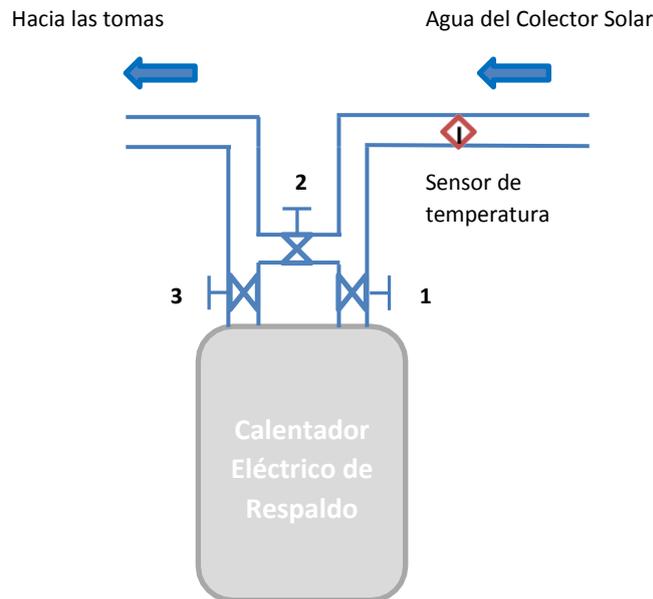


Fig. 71. Ubicación de las electroválvulas para el control del flujo del agua caliente.

El esquema de funcionamiento de las electroválvulas estaría determinado por la temperatura medida por el sensor, en caso de ser igual o mayor a la temperatura objetivo, las electroválvulas de entrada y salida, 1 y 3 respectivamente, permanecerían cerradas mientras la número 2 abierta, para el caso en el que la temperatura fuera menor a la temperatura objetivo, se invertirían las posiciones de las electroválvulas, quedando abiertas 1 y 3, y cerrada la número 2 para evitar una mezcla de flujos.

4.7 Propuesta del Sistema de Control y Monitoreo

Una vez analizadas las necesidades e incorporados los sistemas o componentes adicionales en la etapa anterior de diseño, se solidificó una propuesta integral para el sistema completo de control y monitoreo para el prototipo.

- Propuesta de instrumentación y monitoreo

Un último paso antes de la manufactura y pruebas de los componentes fue el llevar a cabo una discusión con el equipo de arquitectura con respecto a la ubicación final de dichos componentes en caso de requerir una intervención directa, como el caso de los sensores de las variables de confort.

Estos componentes tienen la ventaja de ser de dimensiones relativamente pequeñas y pueden integrarse con facilidad a cualquier arquitectura con una intervención relativamente pequeña.

Esta discusión tuvo en choque el punto de vista ingenieril, que busca la funcionalidad, contra el punto de vista arquitectónico, que se enfoca en la estética e integración de espacios. Una vez conocidas las ubicaciones de los sensores de la organización, los requerimientos de la parte técnica fueron que debían estar al menos en un punto de cada habitación, lo más cercano al punto de medición donde sería colocado el trípode de la organización, que para los tres habitáculos coincidió aproximadamente al centro de cada habitación y a una altura de 1.50 m, siguiendo las normas mencionadas en el capítulo segundo de este trabajo. Teniendo presente estas limitaciones, durante la discusión se llegó a la conclusión de que un punto en el muro más próximo sería la mejor solución para la ubicación de los sensores en cada habitáculo. En la figura 72 se muestran los muros a intervenir para la instalación de los sensores de las variables de confort.



Fig. 72. Ubicación de los puntos a intervenir para la instalación de los sensores de medición de variables de confort.

Una vez teniendo los puntos específicos a intervenir, se tuvo que diseñar una forma en la que se pudieran contener dichos sensores en el interior del muro y se decidió contenerlos en módulos con el fin de darles soporte y protección.

Antes de seleccionar o fabricar un gabinete fue necesario conocer todos los componentes involucrados en el funcionamiento de los sensores, como componentes de amplificación, regulación, alimentación, protección, etc. La figura 73 muestra la integración final de los componentes para la filtración y rectificación de voltaje para un módulo de monitoreo.

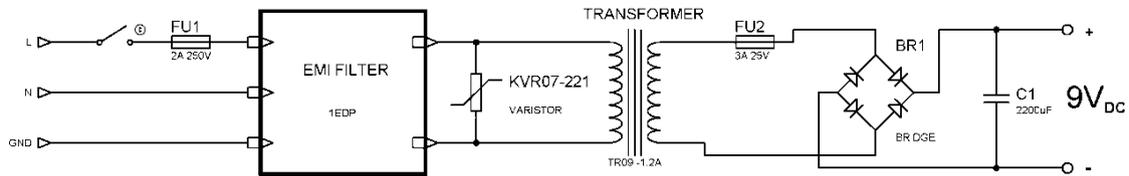


Fig. 73. Etapa de filtración y rectificación de voltaje para un módulo de monitoreo.

Dado que el sensor de dióxido de carbono requiere una alimentación de $6V_{DC}$ y los demás sensores de $5V_{DC}$ y como medida de seguridad, se diseñó una etapa de regulación dividida como se muestra en la figura 74.

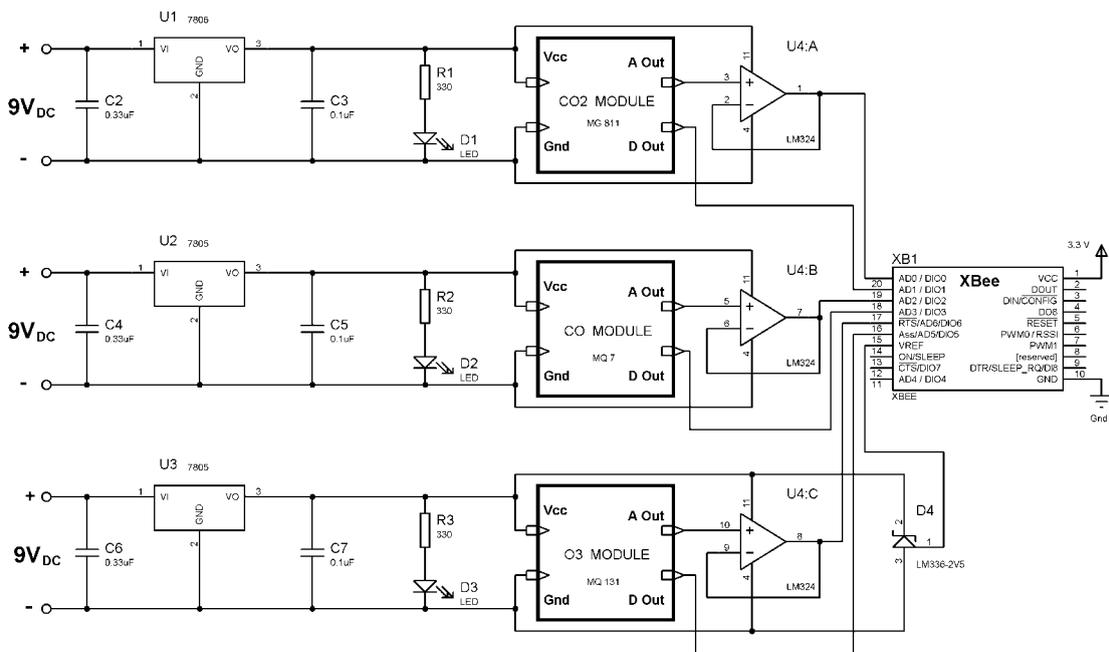


Fig. 74. Etapa de regulación para los módulos de CO_2 , CO y O_3 conectados al primer Xbee.

Considerando que la salida de todos los sensores se encontraba dentro de una ventana de 0 a $2 V_{DC}$ se utilizó un LM336 2V5, que es un diodo de voltaje de referencia a $2.5 V_{DC}$ para el convertidor analógico digital del Xbee con el fin de tener mayor resolución al momento de realizar las lecturas.

Cabe resaltar que no se diseñó una etapa de regulación para la alimentación de los módulos Xbee ya que se utilizaron los Xbee Explorer Regulated, los cuales son circuitos impresos prefabricados que contienen una etapa de regulación de $5V_{DC}$ a $3.3V_{DC}$, así como del acondicionamiento de la señal serial con el fin de poder conectar

libremente con cualquier microcontrolador y alimentar dicho módulo con 5V_{DC}. La figura 75 muestra este circuito impreso y el montaje de un Xbee.

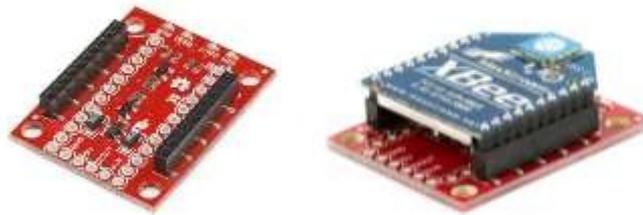


Fig. 75. Xbee Explorer Regulated. [51]

En la figura 76 se muestra la etapa de regulación para los sensores de temperatura, humedad y VOC's.

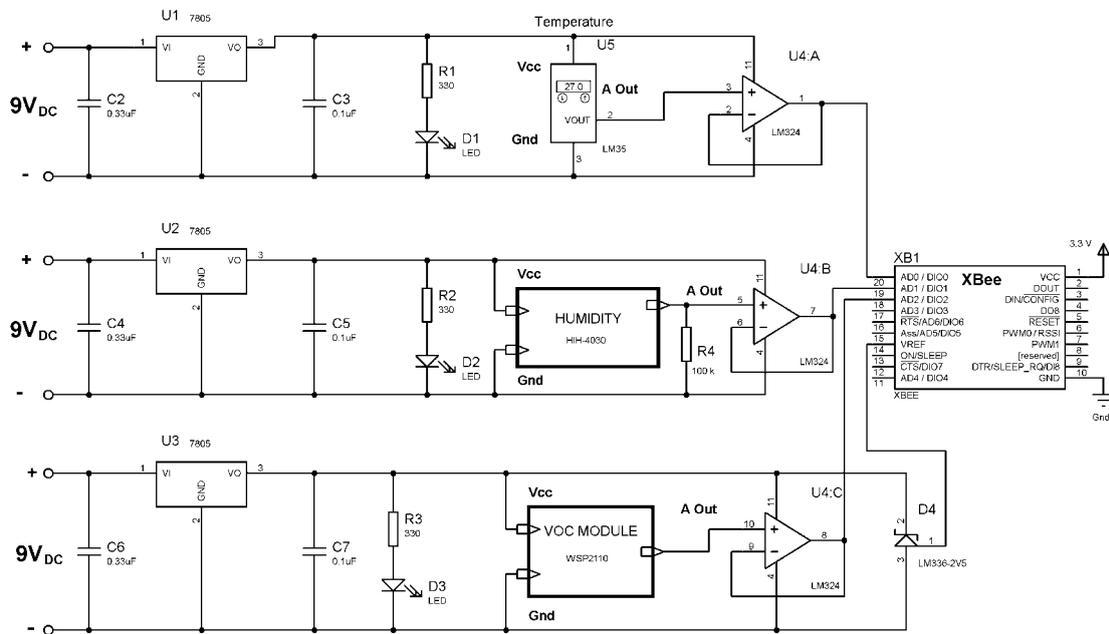


Fig. 76. Etapa de regulación y filtrado de voltaje para la alimentación de los sensores de temperatura, humedad y VOC's.

Con el fin de llevar a cabo la medición más precisa de los valores arrojados por los sensores, se utilizaron amplificadores operacionales a la salida de los sensores en configuración de seguidor de voltaje, gracias a esto se logra un desacople de las impedancias y se mejoran las lecturas de las variables de confort.

Con respecto a los sensores de iluminación y sonido previamente seleccionados, se excluyeron de estos módulos de monitoreo ya que su ubicación no correspondía con las posiciones de donde fueron llevadas a cabo las pruebas de iluminación natural y aislamiento acústico, además al ser pruebas puntuales, carecía de sentido tener un

monitoreo de estas variables. Con lo anterior, se optó por realizar pruebas sobre el prototipo una vez terminado con el fin de poder evaluar estas variables de confort, sin embargo, al saber que no se construiría completamente el prototipo en México se decidió abandonar el diseño e implementación de estos sensores.

- Propuesta de control

Una vez teniendo resuelta la etapa de medición de variables y comunicación, fue necesario diseñar un módulo de control que coordinara a los módulos de monitoreo con el fin de tener orden y una secuencia de muestreo.

Debido a la ubicación de los acopladores de bus, este módulo de control se ubicó en la banca técnica lo más cercano al tablero de Clipsal donde se encontraban los acopladores de bus, con la idea de respetar las indicaciones del fabricante de no exceder 50 cm de cable entre cualquier terminal de entrada y su común del acoplador de bus como se explicó anteriormente.

Este módulo de control, además de realizar las tareas ya mencionadas, debía tener la capacidad de comunicarse con el sensor de temperatura sumergible ubicado en la tubería de agua caliente proveniente de los colectores solares, y tener control sobre las electroválvulas instaladas en la tubería de entrada, salida y paso del calentador eléctrico de respaldo.

La propuesta de control de las electroválvulas contempló utilizar relevadores incorporados en el módulo de control, mientras que la comunicación con los acopladores de bus mediante un contacto seco se efectuaría mediante el uso de optoacopladores, también llamados aisladores acoplados ópticamente. En la figura 77 se muestra la integración de los componentes seleccionados para la alimentación del módulo de control y en el anexo 3 (diagrama de los componentes del módulo de control) se muestra la integración de los componentes del circuito del mismo.

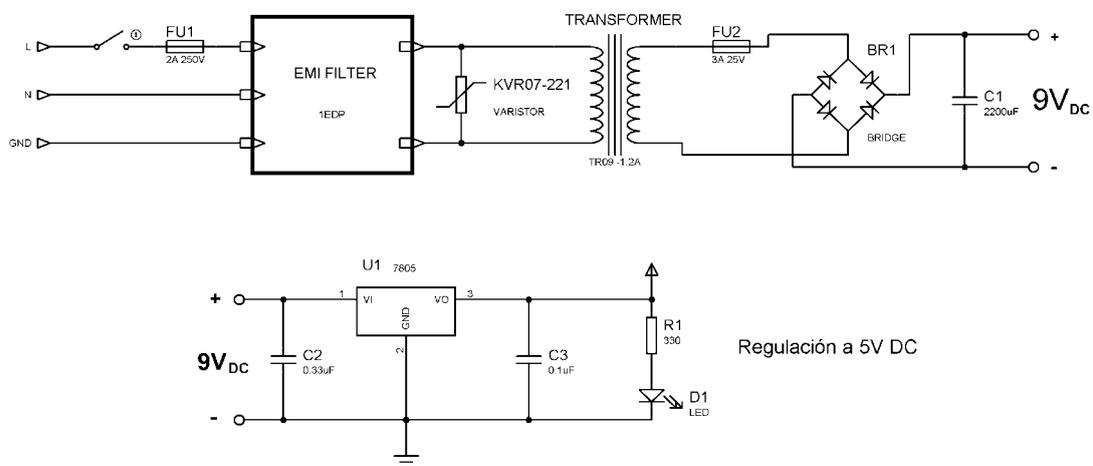


Fig. 77. Integración de los componentes del módulo de control para la etapa de filtrado, rectificación y regulación.

Pese a que se requirieron de tres relevadores para el control de las electroválvulas que controlan el flujo de agua caliente, se adicionó un cuarto relevador y ocho entradas libres de los catorce pines sobrantes del microcontrolador, en caso de ser necesarias posteriormente para incorporar sensores adicionales y tener un sistema flexible. Por otro lado, únicamente se utilizaron cuatro salidas a optoacoplador, tres para la señal hacia los ERV's y una cuarta para el calentador eléctrico de respaldo, dejando libres ocho optoacopladores o entradas al sistema de Clipsal.

Cabe mencionar que el sistema Clipsal fue sobredimensionado con el fin de tener una holgura en la cantidad de cargas a controlar, tanto de dimmers como de relevadores, siendo en total dos bancos de cuatro dimmers cada uno y cinco bancos de cuatro relevadores para dar un total de ocho canales de dimmers y veinte de relevadores, de los cuales únicamente se utilizaron tres y nueve, respectivamente. En el anexo 4 (cargas controladas por Clipsal) se puede ver la distribución de las cargas propuestas para dichos componentes.

Una vez teniendo la propuesta del sistema de control y monitoreo, fue necesario desarrollar una propuesta del funcionamiento integral del sistema previo a una etapa de simulación y pruebas con el fin de tener una idea clara del algoritmo de operación y de los requerimientos de programación. En el anexo 5 (diagrama de flujo del sistema de control y monitoreo) se muestra la lógica de su funcionamiento por habitación.

De igual forma, el sistema Clipsal debió obedecer a un diagrama de flujo con el fin de tener un comportamiento adecuado a las necesidades, por ejemplo el control automático de iluminación interior y exterior, del calentador eléctrico, de los ERV's o de cualquier carga conectada al mismo.

Debido a que el control del calentador eléctrico y ERV's sería activado directamente con una señal de contacto seco mediante los acopladores de bus, su diagrama de flujo se obvió debido a que están ligados al estado en que se encuentre dicha entrada del acoplador de bus, por lo que debido a su simplicidad y al depender de una sola variable, no se incluyeron en este trabajo. De forma similar, ya que el control de la iluminación exterior depende del valor medido de luminosidad exterior, su funcionamiento es muy simple y su diagrama de flujo también se obvió. Sin embargo, para el control de iluminación interior, al depender de varias variables y condiciones, fue necesario elaborar un diagrama de flujo que mostrara el comportamiento de dicho sistema. El anexo 6 (diagrama de flujo del control de iluminación) muestra la lógica relacionada al control de iluminación interior a través del sistema Clipsal.

5 PRUEBAS Y MANUFACTURA

5.1 Pruebas

Una vez teniendo clara la estructura de la programación a realizar fue importante analizar el comportamiento de los componentes periféricos a la misma, en otras palabras, conocer a fondo los sensores y actuadores seleccionados con el fin de saber cómo interpretar la información enviada de los sensores hacia el microcontrolador y así, se pueda convertir una señal analógica en una cantidad de grados centígrados, humedad relativa o concentración de algún gas.

Para esta tarea, fue necesario contar con la hoja de especificaciones de cada componente, donde generalmente, además de contener información de montaje, alimentación o aplicación típica, se muestran características de su comportamiento.

Como se mencionó anteriormente, la etapa de comunicación fue llevada a cabo por el Ing. Carlos Canchola y por lo tanto las pruebas mostradas en esta sección fueron realizadas directamente con el microcontrolador PIC 16F887 y los sensores antes mencionados.

5.1.1 Sensores

Todo sensor consiste en un transductor, que es esencialmente un convertidor de un tipo de energía en otro pero con cierta dependencia o proporcionalidad una de la otra, por ejemplo un sensor de temperatura recibe energía en forma de calor y entrega energía eléctrica, donde la relación de estas variables dependerá de la naturaleza del sensor. En esta sección se

5.1.1.1 Temperatura

El sensor seleccionado para la medición de esta variable fue el LM35, el cual posee la ventaja de estar calibrado directamente en grados Celsius. La terminal de salida del sensor arroja un voltaje correspondiente a la temperatura, con una relación lineal de 10 mV / ° C. Sin embargo, ya que el microcontrolador no hace una lectura directa de los milivolts presentes en una terminal sino que los convierte en un valor digital a través del ADC o convertidor analógico-digital, es necesaria una conversión numérica de dicho valor obtenido por el convertidor.

El tener un ADC de 10 bits significa que tiene una resolución de $2^{10}-1$ bits o sea un valor en decimal de 1023 unidades de conversión, lo que equivale a una señal de 5 V. Con lo anterior se puede saber la relación de equivalencia entre unidades del convertidor y volts, lo que para conocer la cantidad de volts medida corresponde a 5 V / 1023 o aproximadamente 0.0048876 volts por cada unidad de conversión, que equivale a 4.8876 mV por unidad de conversión. Teniendo esto en cuenta y que la relación de la salida del sensor es 10 mV / ° C, se tiene una relación final de 0.48876 ° C por cada unidad de conversión. [52]

5.1.1.2 *Humedad Relativa*

Para el caso de la humedad relativa se seleccionó el sensor HIH-4030 de Honeywell, el cual tiene un rango de medición de 0 % a 100 % y una salida analógica casi lineal. Tomando en cuenta la información brindada por la hoja de datos del fabricante, se observó que existe una ecuación que relaciona el voltaje de salida del sensor con la humedad relativa, la cual es:

$$V_{OUT} = (V_{SUPPLY})(0.0062(\text{sensor RH}) + 0.16)$$

De donde V_{OUT} es el voltaje de la salida del sensor, V_{SUPPLY} es el voltaje de alimentación del sensor, ambos en V o mV, y sensor RH es la humedad relativa, de donde despejando la humedad relativa, nos queda:

$$\text{sensor RH} = \frac{\frac{V_{OUT}}{V_{SUPPLY}} - 0.16}{0.0062}$$

Donde haciendo un poco de álgebra, simplificando y considerando $V_{SUPPLY} = 5 \text{ V}$, nos queda finalmente:

$$\text{sensor RH} = \frac{V_{OUT} - 0.8}{0.031}$$

De la misma hoja de datos, se observó que existe un factor de compensación por efectos de temperatura, el cual es:

$$\text{True RH} = \frac{\text{sensor RH}}{1.0546 - 0.00216 T}$$

Donde True RH es el valor real de humedad relativa y T es la temperatura medida en grados centígrados. [53]

5.1.1.3 *Dióxido de Carbono*

De la misma manera, se observó la hoja de datos del fabricante del sensor MG811 con el fin de conocer la relación de las partes por millón de CO₂ con los milivolts medidos y aunque no se muestra ningún valor de correlación, se muestra una gráfica para el comportamiento de la señal del sensor al ser expuesto a diferentes concentraciones de CO₂ y otros gases, la cual se muestra en la figura 78.

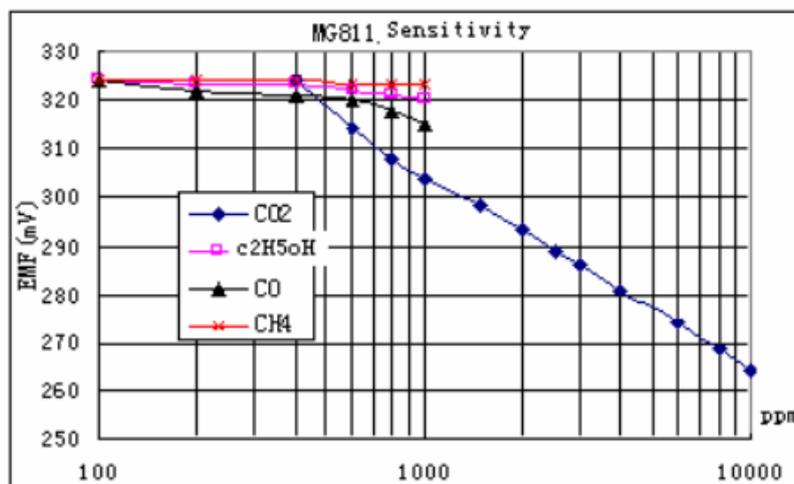


Fig. 78. Curva de sensibilidad del sensor MG-811 ante distintas concentraciones de CO₂ y otros gases. [54]

De la gráfica anterior se seleccionaron tanto los puntos marcados como los cruces de la curva con las líneas de concentración y de mili volts con el fin de poder obtener una ecuación de correlación, de donde se observó que dicha curva posee dos pendientes, por lo tanto está generada por dos ecuaciones distintas, con lo que se separaron dichos puntos tomando como punto de cambio de pendiente el cruce con la línea de 800 ppm. Para ambas tablas se realizó un gráfica utilizando Microsoft Excel y se muestra en la figura 79.

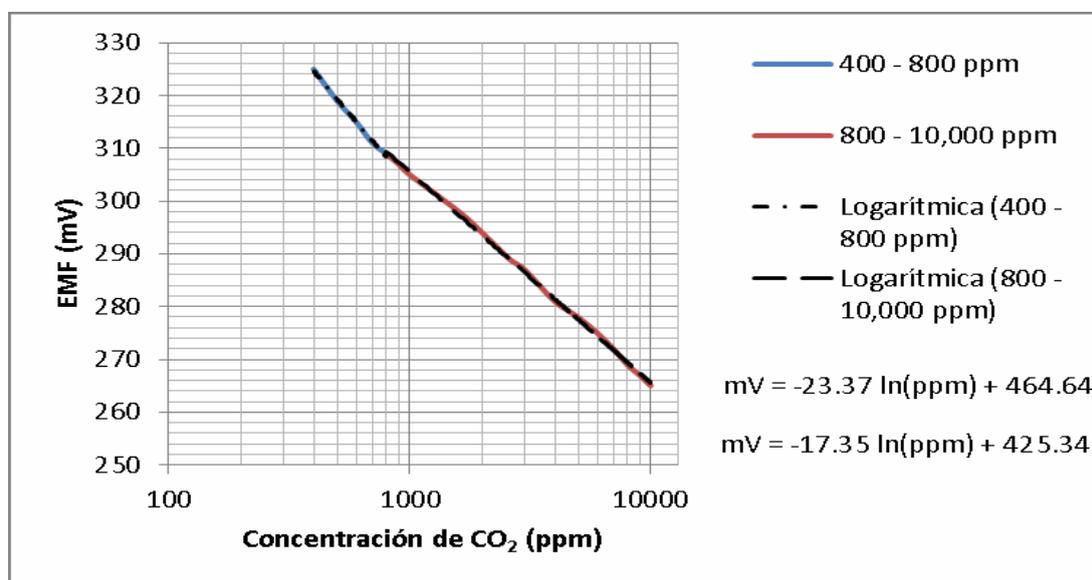


Fig. 79. Curva de sensibilidad del sensor MG-811 graficada en Microsoft Excel.

Dado que la gráfica original corresponde a una representación semilogarítmica, donde el eje de las ordenadas tiene una escala lineal y el eje de las abscisas una escala logarítmica, se configuró dicho eje con la escala mencionada en las propiedades de formato del mismo, logrando la visualización mostrada similar a la de la hoja de datos.

Posteriormente se generó una línea de tendencia (en color negro) y en el apartado de tipo de tendencia o regresión se seleccionó logarítmica y finalmente, se marcó la opción de presentar ecuación en el gráfico.

Gracias a este procedimiento se pudo obtener una relación entre el voltaje medido y la concentración en partes por millón, quedando ambas ecuaciones como se muestran a continuación:

$$mV = -23.37 \ln(\text{CO}_2 \text{ ppm}) + 464.64, \quad \text{para el intervalo de 400 a 800 ppm y}$$

$$mV = -17.35 \ln(\text{CO}_2 \text{ ppm}) + 425.34, \quad \text{para el intervalo de 800 a 10,000 ppm.}$$

Despejando el valor de la concentración de CO₂ de las ecuaciones anteriores, nos queda:

$$\text{CO}_2 \text{ ppm} = e^{\frac{mV-464.64}{-23.37}}, \quad \text{para el intervalo de 400 a 800 ppm (324.62mV a 308.42mV), y}$$

$$\text{CO}_2 \text{ ppm} = e^{\frac{mV-425.34}{-17.35}}, \quad \text{para el intervalo de 800 a 10,000 ppm (308.42mV a 265.54mV).}$$

5.1.1.4 Monóxido de Carbono

Se llevó a cabo un procedimiento similar para el sensor MQ-7 y se buscó en la hoja del fabricante información relacionada a la interpretación del voltaje de salida con respecto a la concentración del gas medido, sin embargo, lo único que proporciona el fabricante es una gráfica que relaciona el cociente de Rs/Ro contra la concentración en ppm. La gráfica se muestra en la figura 80.

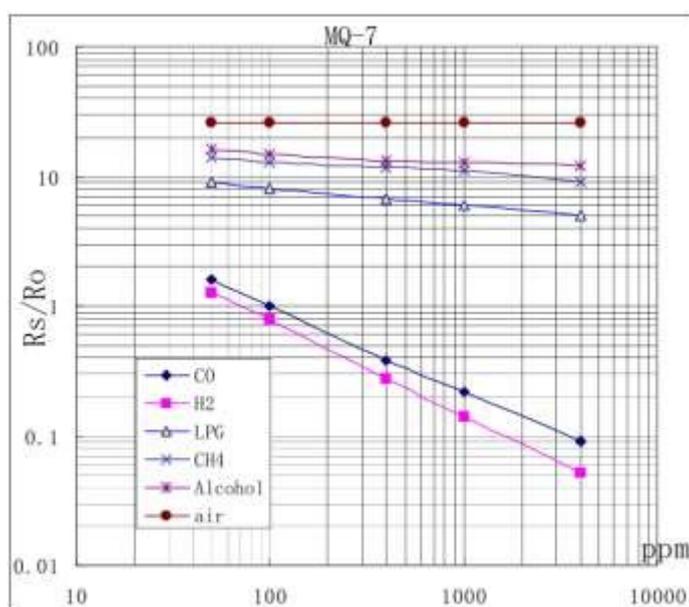


Fig. 80. Curva de sensibilidad del sensor MQ – 7 expuesto a distintas concentraciones de CO y otros gases.[55]

Dado que no se tiene una relación directa con el voltaje de salida del módulo, se buscó una forma de relacionarlo a través de R_s/R_o , donde R_s es el valor de la resistencia del sensor expuesto a concentraciones diferentes del gas y R_o es el valor de la resistencia del sensor expuesto a aire limpio.

Con base en lo anterior, se buscó la forma de medir el valor de dicha resistencia ya que el microcontrolador puede medir directamente un voltaje. Afortunadamente en la hoja del fabricante se muestra un diagrama de aplicación típica en donde se puede apreciar una resistencia de carga, dicho diagrama se muestra en la figura 81.

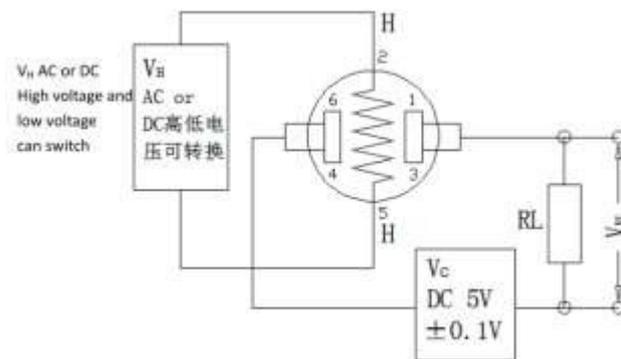


Fig. 81. Diagrama del circuito de prueba para el sensor de monóxido de carbono MQ- 7. [55]

Si para el circuito de prueba se utiliza el mismo voltaje de alimentación que el de calentamiento, en otras palabras, si V_C es igual a V_H , entonces el circuito se reduce al circuito que se muestra en la figura 82.

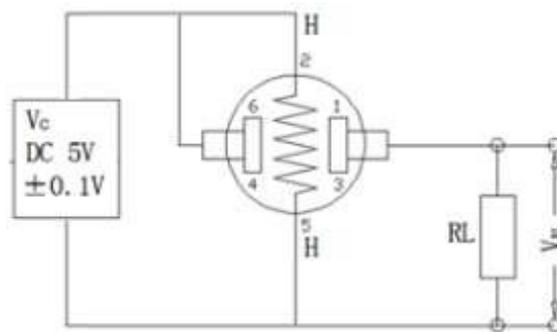


Fig. 82. Circuito de prueba simplificado utilizando el mismo voltaje para V_C y V_H .

Del diagrama anterior se puede ver que el voltaje medido se toma de un punto intermedio entre la resistencia del sensor y la de carga, haciendo un divisor de voltaje. Un diagrama equivalente se muestra en la figura 83.

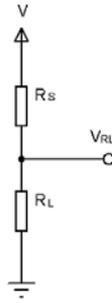


Fig. 83. Divisor de voltaje entre la resistencia del sensor y la de carga, donde R_S es la resistencia del sensor, R_L la resistencia de carga, V el voltaje de alimentación y V_{RL} el voltaje en la resistencia de carga.

De la figura anterior, y aplicando la fórmula del divisor de voltaje entre dos resistencias, obtenemos la siguiente expresión:

$$V_{RL} = \frac{R_L}{R_S + R_L} V$$

A la expresión anterior es necesario aplicar un poco de álgebra para poder despejar R_S , el desarrollo se muestra a continuación:

$$R_S + R_L = \frac{R_L}{V_{RL}} V, \quad R_S = \frac{R_L}{V_{RL}} V - R_L, \quad R_S = \frac{R_L(V)}{V_{RL}} - \frac{R_L(V_{RL})}{V_{RL}}, \quad R_S = \frac{V - V_{RL}}{V_{RL}} R_L$$

De la expresión anterior, el valor V y R_L son conocidos y V_{RL} es medido mediante el microcontrolador, lo que al sustituir datos, nos da el valor de R_S , que es el valor de la resistencia del sensor expuesta a cierta concentración del gas.

Sin embargo, el eje de las ordenadas está dado por el cociente de R_S/R_0 , donde R_0 es el valor de la resistencia del sensor expuesta al aire limpio. Con base en lo anterior se obtuvo la ecuación de la curva para la sensibilidad del sensor con respecto a R_S/R_0 mediante una gráfica en Excel. Dicha gráfica se muestra en la figura 84.

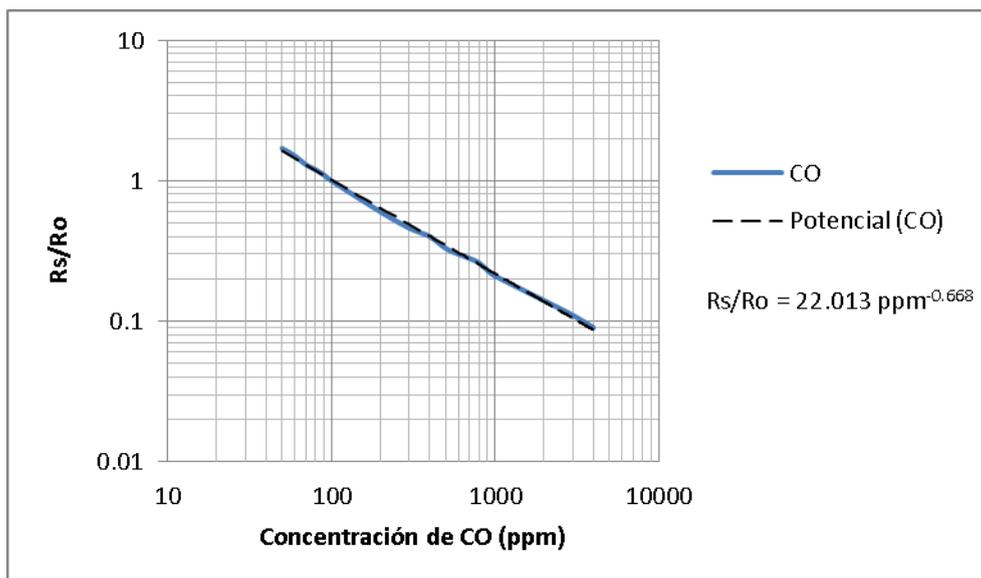


Fig. 84. Curva de sensibilidad del sensor MQ-7 graficada en Microsoft Excel.

Gracias al uso de la línea de tendencia se pudo generar la ecuación que relaciona el cociente R_s/R_o con las partes por millón de CO y se muestra a continuación:

$$\frac{R_s}{R_o} = 22.013 \text{ ppm}^{-0.668}$$

Donde una vez medido R_s y R_o , se tiene que despejar el valor de la concentración en partes por millón, que al aplicar un poco de álgebra queda de la siguiente manera:

$$\frac{R_s}{R_o} = 22.013 \text{ ppm}^{-0.668}, \quad \frac{R_s}{R_o (22.013)} = \frac{1}{\text{ppm}^{0.668}}, \quad \text{ppm}^{0.668} = \frac{R_o (22.013)}{R_s},$$

$$\text{Finalmente queda, CO ppm} = \sqrt[0.668]{\frac{R_o}{R_s} (22.013)}$$

De la gráfica que relaciona R_s/R_o con las partes por millón de CO se puede observar el comportamiento del sensor expuesto al aire limpio, lo cual nos sirve para obtener R_o . Si se observa la parte superior de dicha gráfica, la recta horizontal corresponde al aire limpio, cuya ecuación sería:

$$\frac{R_s}{R_o} = 11.8, \quad \text{de donde se despeja } R_o \text{ y queda } R_o = \frac{R_s}{11.8}$$

Para lo que habría que realizar una medición de la resistencia del sensor en aire limpio y dividir el valor obtenido según la ecuación obtenida para R_s en función del voltaje de alimentación, el voltaje medido de la resistencia de carga y el valor de dicha resistencia.

Por otra parte, existe una forma alternativa para obtener la concentración en partes por millón del gas. Observando la última versión de la hoja de datos del fabricante, se muestra una gráfica en la que se relaciona directamente el voltaje de la resistencia de carga (V_{RL}) con las partes por millón de CO, utilizando una resistencia de carga (R_L) de 4.7 KOhms. Dicha gráfica se muestra en la figura 85.

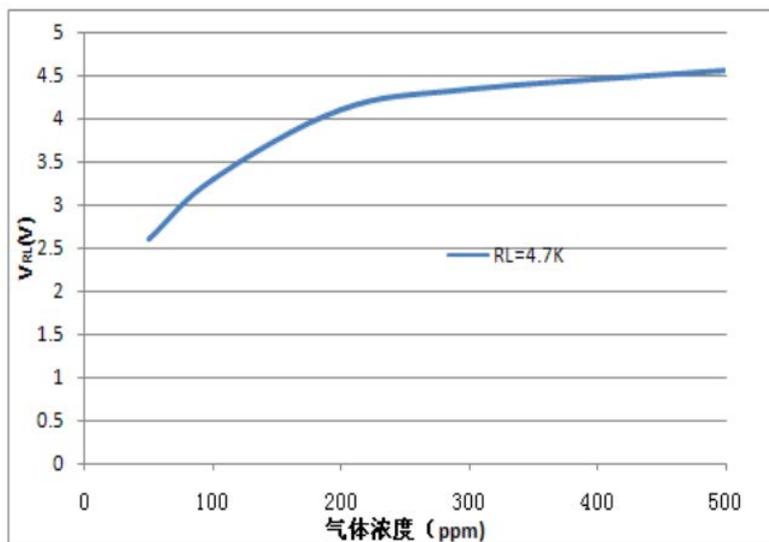


Fig. 85. Gráfica de la relación del voltaje de la resistencia de carga con las partes por millón de CO. [55]

Con base en esta gráfica, se seleccionaron puntos para ser graficados en Excel con el fin de generar una curva de tendencia y posteriormente, obtener la ecuación de dicha curva. Dado que la curva refleja dos comportamientos, se consideraron dos segmentos de la misma para el análisis, dicha gráfica se muestra en la figura 86.

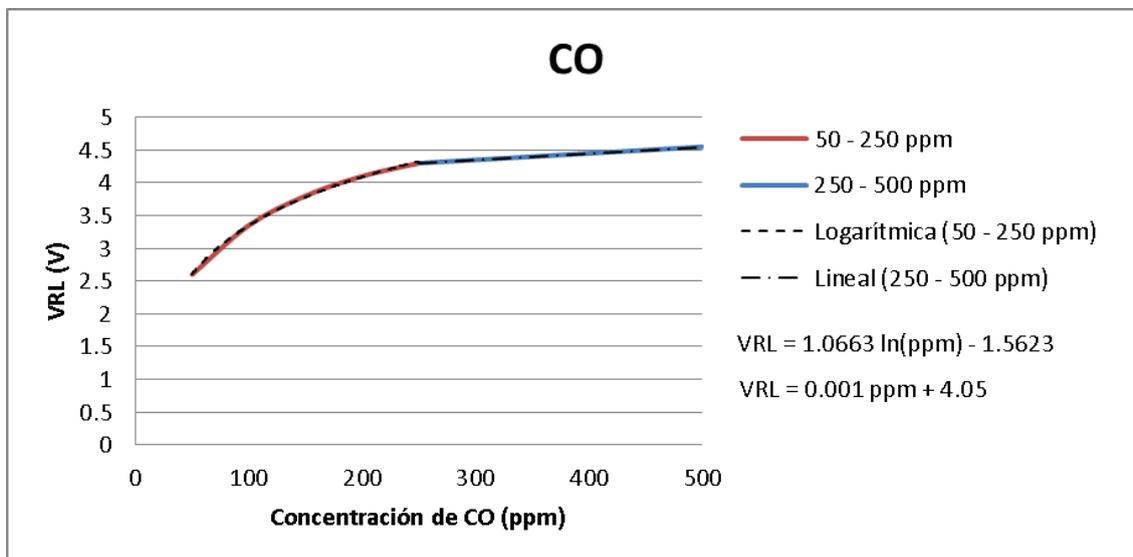


Fig. 86. Curva del voltaje de la resistencia de carga VRL en relación con la concentración de monóxido de carbono en ppm.

De la gráfica anterior se generaron dos líneas de tendencia, de las cuales se extrajeron las ecuaciones que determinan el comportamiento del voltaje de la resistencia de carga V_{RL} en función de la concentración de CO, las cuales son:

$$V_{RL} = 1.0663 \ln (\text{ppm}) - 1.5623, \quad \text{para valores entre 50 y 250 ppm y}$$

$$V_{RL} = 0.001 \text{ ppm} + 4.05, \quad \text{para valores entre 250 y 500 ppm.}$$

De las ecuaciones anteriores y aplicando un poco de álgebra para despejar la concentración en ppm, nos queda:

$$\text{CO ppm} = e^{\frac{VRL + 1.5623}{1.0663}} \quad \text{para concentraciones entre 50 y 250 ppm (2.6V y 4.32V), y}$$

$$\text{CO ppm} = \frac{VRL - 4.05}{0.001} \quad \text{para concentraciones entre 250 y 500 ppm (4.32V y 4.55V).}$$

5.1.1.5 Ozono

Para el sensor de ozono MQ-131 se realizó el mismo procedimiento con base en la hoja de datos del fabricante, de donde se analizó la gráfica que relaciona el cociente R_s/R_o con la concentración en partes por billón de dicho gas. Dicha gráfica se muestra en la figura 87.

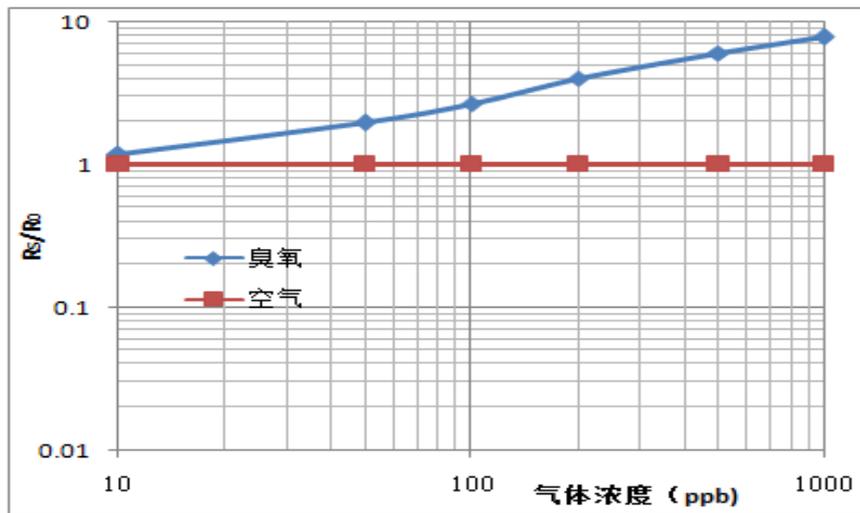


Fig. 87. Gráfica de la sensibilidad del sensor MQ-131 ante distintas concentraciones de O₃. [56]

Siguiendo con el análisis utilizado hasta el momento, se realizó la misma gráfica en Excel tomando los puntos de la misma, con el fin de generar una curva similar y posteriormente, su línea de tendencia, con la cual es posible determinar la ecuación de dicha curva. Dicha gráfica se muestra en la figura 88.

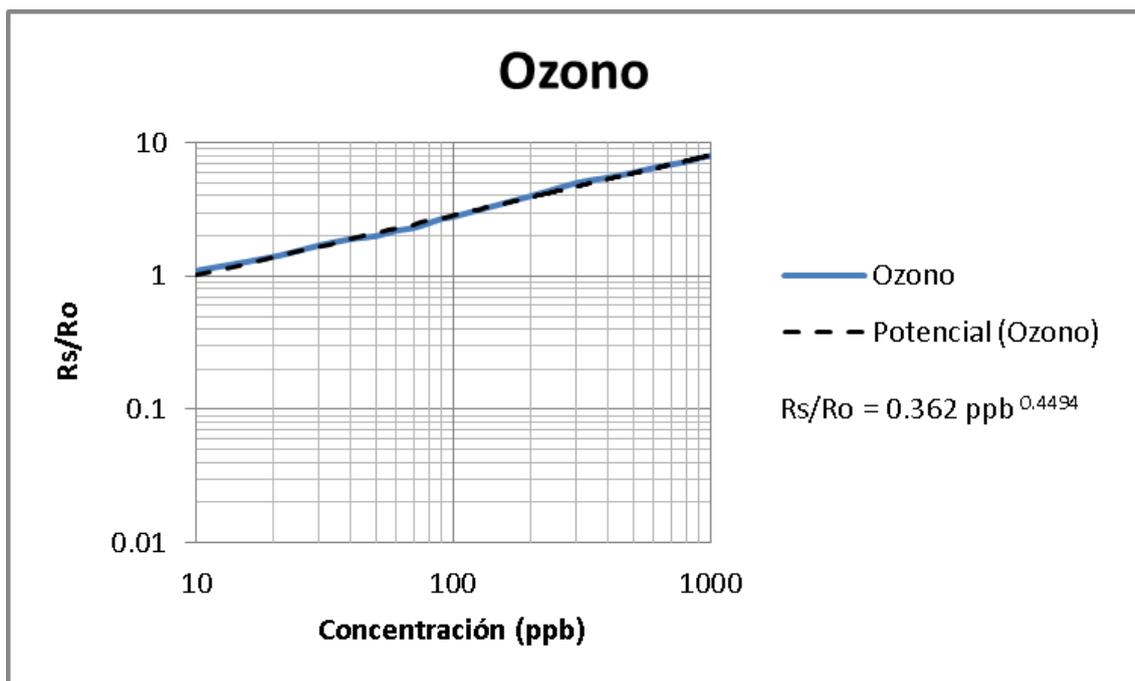


Fig. 88. Curva de sensibilidad del sensor MQ-131 graficada en Microsoft Excel.

De la gráfica anterior y gracias a la línea de tendencia, se puede obtener la ecuación que describe el comportamiento del cociente Rs/Ro con respecto a la concentración de ozono a la que se exponga en sensor. Dicha ecuación se muestra a continuación:

$$\frac{Rs}{Ro} = 0.362 \text{ ppb}^{0.4494}$$

De la cual, al aplicar un poco de álgebra, se puede despejar la concentración en partes por billón y queda de la siguiente manera:

$$O_3 \text{ ppb} = \frac{0.4494 \sqrt{R_s}}{\sqrt{R_o (0.362)}}$$

De la gráfica de sensibilidad se puede ver que la respuesta del sensor al aire limpio es $R_s/R_o = 1$, lo que implica que el valor medido en condiciones de aire limpio mediante la ecuación para R_s en función de V , V_{RL} y R_L es directamente R_o .

De igual forma que se realizó con el sensor de monóxido de carbono, se observó la hoja de datos del fabricante, de la cual se extrajo la gráfica que relaciona el voltaje de la resistencia de carga con la concentración en partes por billón de ozono a la que se expuso el sensor. Dicha gráfica se muestra en la figura 89.

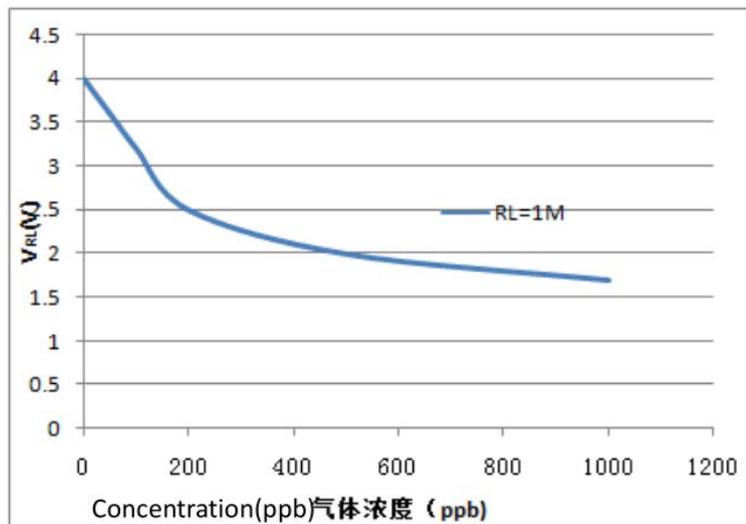


Fig. 89. Gráfica de la relación del voltaje de la resistencia de carga con las partes por millón de O_3 . [56]

Basándose en la gráfica anterior, se seleccionaron puntos para generar una gráfica muy cercana a la misma y así, con la ayuda de la línea de tendencia, poder obtener la ecuación que describe el comportamiento del voltaje de la resistencia de carga con respecto a la concentración en partes por billón a la que es expuesto el sensor. Dicha gráfica se muestra en la figura 90.

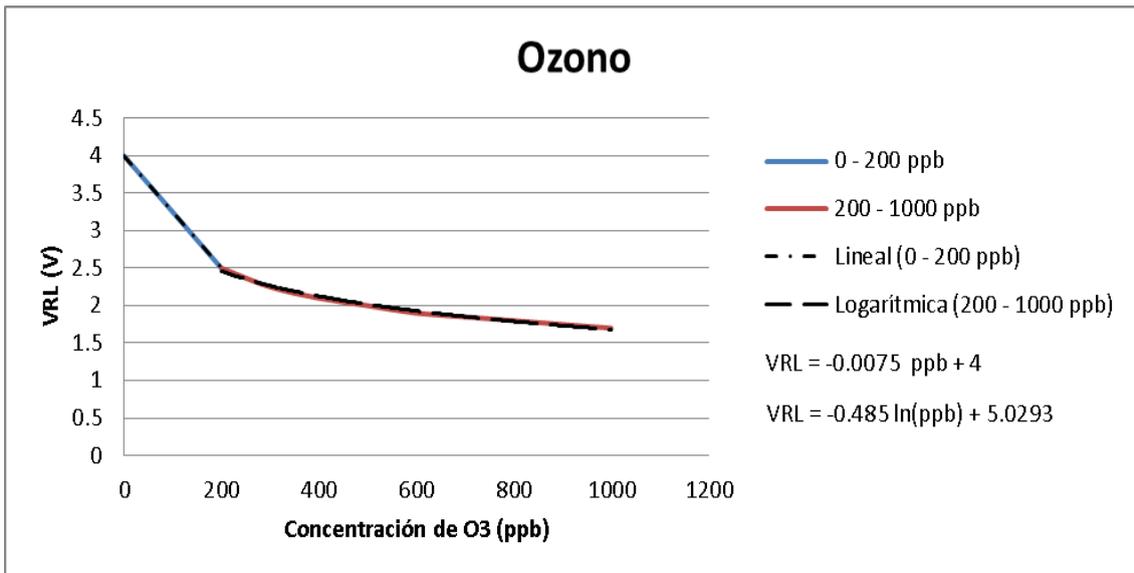


Fig. 90. Curva del voltaje de la resistencia de carga VRL en relación con la concentración de ozono en ppb.

Debido a que se tienen dos comportamientos diferentes en la misma curva, se decidió segmentarla en el punto donde ambos coinciden, que fue a las 200 ppb, generando así dos curvas y por lo tanto dos líneas de tendencia, con las cuales se generaron las ecuaciones que determinan el comportamiento del voltaje de la resistencia de carga con respecto a la concentración a la que es expuesto el sensor. Dichas ecuaciones son:

$$VRL = -0.0075 \text{ ppb} + 4, \quad \text{para concentraciones de 0 a 200 ppb, y}$$

$$VRL = -0.485 \ln(\text{ppb}) + 5.0293, \quad \text{para concentraciones de 200 a 1000 ppb.}$$

De las ecuaciones anteriores, y aplicando un poco de álgebra, se puede despejar la concentración en ppb, quedando de la siguiente manera:

$$O_3 \text{ ppb} = \frac{VRL-4}{-0.0075}, \quad \text{para concentraciones de 0 a 200 ppb (4V a 2.5V) y}$$

$$O_3 \text{ ppb} = e^{\frac{VRL-5.0293}{-0.485}}, \quad \text{para concentraciones de 200 a 1000 ppb (2.5V a 1.68V).}$$

5.1.1.6 *Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC's)*

De igual forma, para el sensor de compuestos orgánicos volátiles WSP2110, se realizó un procedimiento similar con el fin de obtener las curvas de comportamiento y a través de las mismas poder obtener la ecuación que refleja la respuesta en voltaje de dicho sensor ante distintas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles. Con base en lo anterior se revisó la hoja de datos del fabricante de donde se obtuvo la gráfica de la curva de sensibilidad del sensor. Dicha gráfica se muestra en la figura 91.

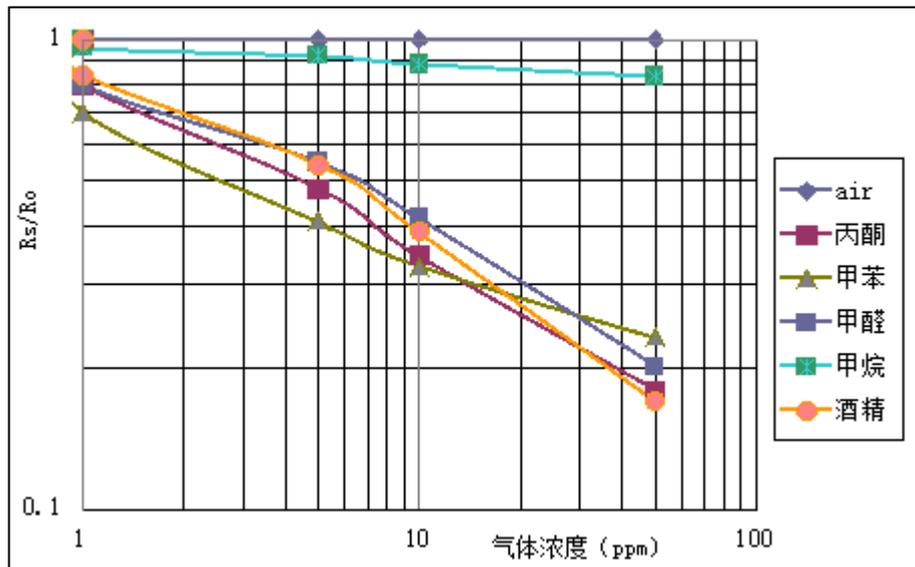


Fig. 91. Gráfica de la sensibilidad del sensor WSP2110 ante distintos gases y concentraciones. Se muestra la respuesta ante acetona en rojo, ante tolueno en verde, ante metanal (formaldehído) en morado, ante metano en azul claro y ante alcohol en anaranjado. [57]

Como puede apreciarse, el sensor responde a varios compuestos distintos, para lo que se generaron cuatro gráficas independientes para poder observar por separado tanto la curva como su línea de tendencia y correspondiente ecuación de comportamiento. La gráfica de la sensibilidad del sensor ante la presencia de acetona, alcohol, metanal y tolueno se muestran en las figuras 92-a a 92-d.

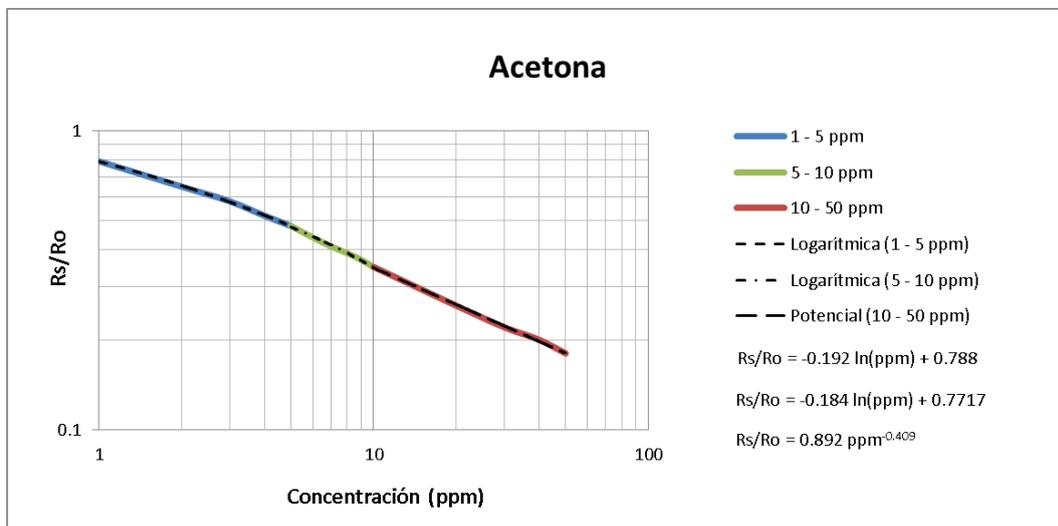


Fig. 92-a. Curva de sensibilidad del sensor WSP2110 ante la presencia de distintas concentraciones de acetona generada en Microsoft Excel.

De la gráfica anterior se puede apreciar que la curva de la sensibilidad del sensor ante la presencia de acetona no tiene un comportamiento lineal, además de presentar distintos comportamientos según la concentración presente, con lo que se dividió en segmentos para su trazado y análisis. Con base en lo anterior, se generaron tres líneas de tendencia según el comportamiento de la curva, con lo que se obtuvieron tres ecuaciones que

representan el comportamiento completo de la sensibilidad del sensor en todo su intervalo de operación, dichas ecuaciones son:

$$\frac{R_s}{R_o} = -0.192 \ln(ppm) + 0.788, \quad \text{para concentraciones de 1 a 5 ppm,}$$

$$\frac{R_s}{R_o} = -0.184 \ln(ppm) + 0.7717, \quad \text{para concentraciones de 5 a 10 ppm y}$$

$$\frac{R_s}{R_o} = 0.892 ppm^{-0.409}, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

De las ecuaciones anteriores, y aplicando un poco de álgebra, se despejó el valor de la concentración en partes por millón de acetona, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Acetona ppm} = e^{\frac{\frac{R_s}{R_o} - 0.788}{-0.192}} \quad \text{para concentraciones de 1 a 5 ppm,}$$

$$\text{Acetona ppm} = e^{\frac{\frac{R_s}{R_o} - 0.7717}{-0.184}} \quad \text{para concentraciones de 5 a 10 ppm y}$$

$$\text{Acetona ppm} = \sqrt[-0.409]{\frac{R_s}{R_o (0.892)}} \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

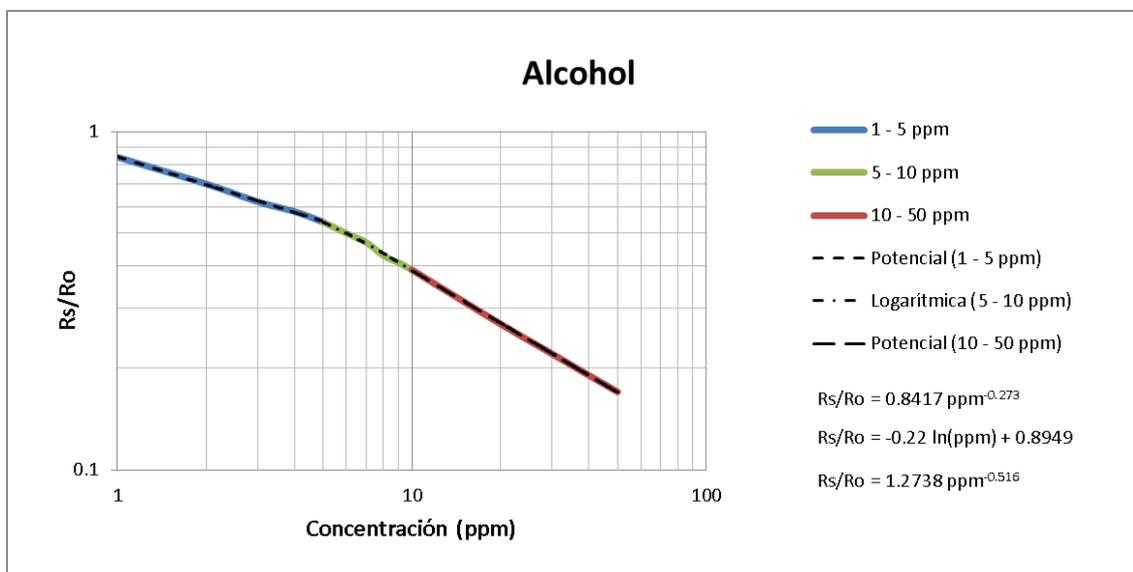


Fig. 92-b. Curva de sensibilidad del sensor WSP2110 ante la presencia de distintas concentraciones de alcohol generada en Microsoft Excel.

Para la respuesta del sensor ante la presencia de alcohol se hizo el mismo análisis que para la acetona, donde al generar la curva correspondiente, se obtuvieron tres ecuaciones correspondientes a las tres pendientes distintas que presenta dicha gráfica. Gracias a las líneas de tendencia se pudieron obtener las ecuaciones correspondientes a la respuesta del

sensor ante distintas concentraciones de alcohol en todo su intervalo de medición. Dichas ecuaciones se presentan a continuación:

$$\frac{R_s}{R_o} = 0.8417 \text{ ppm}^{-0.273}, \quad \text{para concentraciones de 1 a 5 ppm,}$$

$$\frac{R_s}{R_o} = -0.22 \ln(\text{ppm}) + 0.8949, \quad \text{para concentraciones de 5 a 10 ppm y}$$

$$\frac{R_s}{R_o} = 1.2738 \text{ ppm}^{-0.516}, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

De las ecuaciones anteriores, y aplicando un poco de álgebra, se despejó el valor de la concentración en partes por millón de alcohol, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Alcohol ppm} = \sqrt[0.273]{\frac{R_s}{R_o (0.8417)}}, \quad \text{para concentraciones de 1 a 5 ppm,}$$

$$\text{Alcohol ppm} = e^{\frac{\frac{R_s}{R_o} - 0.8949}{-0.22}}, \quad \text{para concentraciones de 5 a 10 ppm y}$$

$$\text{Alcohol ppm} = \sqrt[0.516]{\frac{R_s}{R_o (1.2738)}}, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

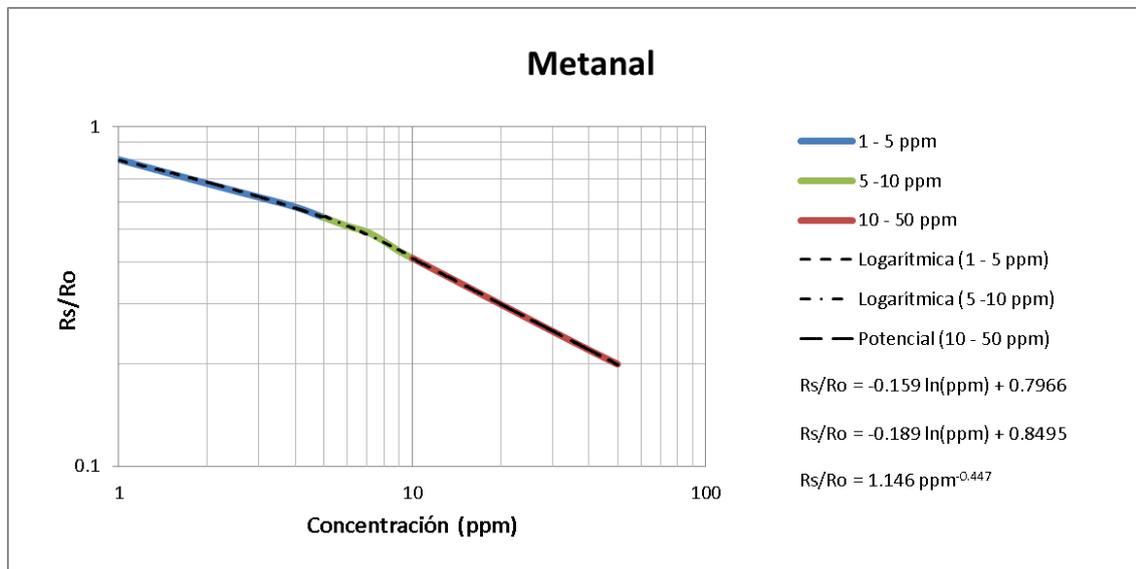


Fig. 92-c. Curva de sensibilidad del sensor WSP2110 ante la presencia de distintas concentraciones de alcohol generada en Microsoft Excel.

De igual forma que con la respuesta para la acetona y para el alcohol, se generó una gráfica para el metanal con el fin de poder conocer el comportamiento de la respuesta del sensor ante diferentes concentraciones de dicho compuesto. Gracias a las líneas de tendencia generadas, se pudieron conocer las ecuaciones que determinan el

comportamiento del sensor ante distintas concentraciones de metanal a lo largo de todo su intervalo de respuesta. Dichas ecuaciones se muestran a continuación:

$$\frac{R_s}{R_o} = -0.159 \ln(ppm) + 0.7966, \quad \text{para concentraciones de 1 a 5 ppm,}$$

$$\frac{R_s}{R_o} = -0.189 \ln(ppm) + 0.8495, \quad \text{para concentraciones de 5 a 10 ppm y}$$

$$\frac{R_s}{R_o} = 1.146 ppm^{-0.447}, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

De las ecuaciones anteriores, y aplicando un poco de álgebra, se despejó el valor de la concentración en partes por millón de metanal, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Metanal ppm} = e^{\frac{\frac{R_s}{R_o} - 0.7966}{-0.159}}, \quad \text{para concentraciones de 1 a 5 ppm,}$$

$$\text{Metanal ppm} = e^{\frac{\frac{R_s}{R_o} - 0.8495}{-0.189}}, \quad \text{para concentraciones de 5 a 10 ppm y}$$

$$\text{Metanal ppm} = \sqrt[-0.447]{\frac{R_s}{R_o (1.146)}}, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

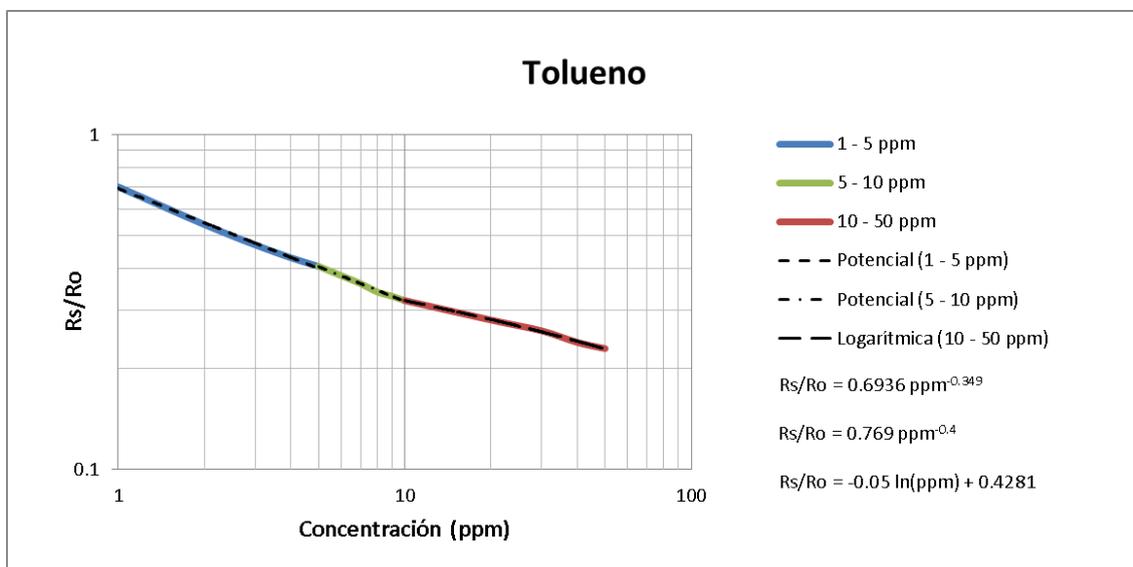


Fig. 92-d. Curva de sensibilidad del sensor WSP2110 ante la presencia de distintas concentraciones de alcohol generada en Microsoft Excel.

Finalmente, para el tolueno se realizó el mismo procedimiento para obtener las curvas que determinan la respuesta del sensor al ser expuesto a dicho compuesto. Gracias a las líneas de tendencia generadas, se pudieron conocer las ecuaciones que determinan el comportamiento del sensor ante distintas concentraciones de tolueno a lo largo de todo su intervalo de respuesta. Dichas ecuaciones se muestran a continuación:

$$\frac{R_s}{R_o} = 0.6936 \text{ ppm}^{-0.349}, \quad \text{para concentraciones de 1 a 5 ppm,}$$

$$\frac{R_s}{R_o} = 0.769 \text{ ppm}^{-0.4}, \quad \text{para concentraciones de 5 a 10 ppm y}$$

$$\frac{R_s}{R_o} = -0.05 \ln(\text{ppm}) + 0.4281, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

De las ecuaciones anteriores, y aplicando un poco de álgebra, se despejó el valor de la concentración en partes por millón de tolueno, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Tolueno ppm} = \sqrt[0.349]{\frac{R_s}{R_o (0.6936)}}, \quad \text{para concentraciones de 1 a 5 ppm,}$$

$$\text{Tolueno ppm} = \sqrt[0.4]{\frac{R_s}{R_o (0.769)}}, \quad \text{para concentraciones de 5 a 10 ppm y}$$

$$\text{Tolueno ppm} = e^{\frac{\frac{R_s}{R_o} - 0.4281}{-0.05}}, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

En la gráfica proporcionada por el fabricante se puede apreciar que existe una recta de la respuesta del sensor al aire limpio, cuya ecuación es $R_s/R_o = 1$, lo que implica que al momento de medir R_o su valor quedará inalterado, quedando $R_o = R_s$.

De la misma forma que con los sensores anteriores, se revisó la hoja de datos del fabricante con el fin de utilizar la gráfica que relaciona el voltaje en la resistencia de carga con la concentración a la que fue sometido el sensor. Dicha gráfica se muestra en la figura X.

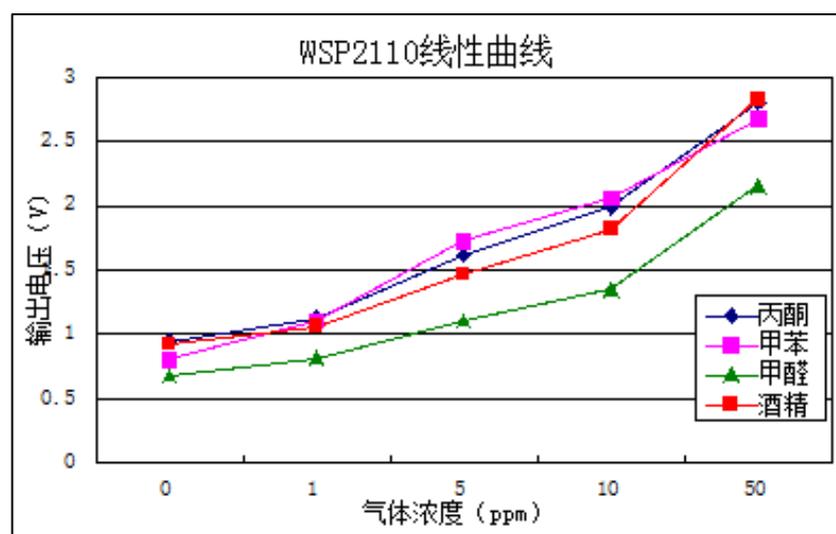


Fig. 93. Voltaje de salida del sensor WSP2110 ante diferentes concentraciones de distintos compuestos (acetona en azul, tolueno en rosa, metanal en verde y alcohol en rojo). [57]

De la figura anterior se tomaron puntos para generar gráficas de la salida de voltaje del sensor al ser expuesto a cada gas. Cabe mencionar que al no tener el eje de las abscisas en una escala lineal, al momento de comparar las curvas parecen distintas. Para estas curvas se utilizó una RL de 10KOhms. La respuesta del sensor a diferentes compuestos se muestra en las figuras 94-a a 94-d.

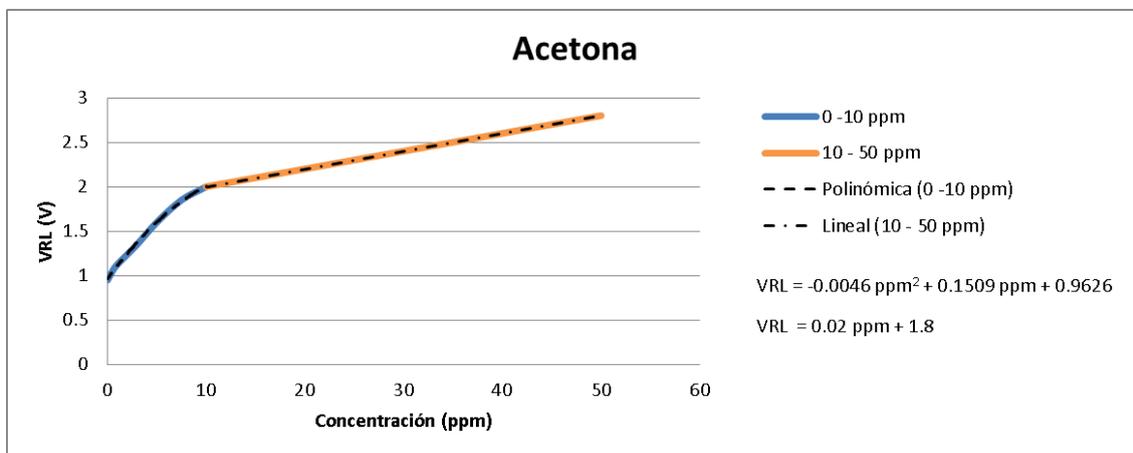


Fig. 94-a. Curva del voltaje de la resistencia de carga VRL en relación con la concentración de acetona en ppm.

De la curva anterior, y gracias a la línea de tendencia, se pudieron obtener las ecuaciones que reflejan el comportamiento del voltaje de la resistencia de carga ante distintas concentraciones de acetona en todo su intervalo de respuesta. Dichas ecuaciones son:

$$VRL = -0.0046 \text{ ppm}^2 + 0.1509 \text{ ppm} + 0.9626, \quad \text{para concentraciones de 0 a 10 ppm y}$$

$$VRL = 0.02 \text{ ppm} + 1.8, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

De las ecuaciones anteriores, y aplicando un poco de álgebra, se despejó el valor de la concentración en partes por millón. Para el primer intervalo se utilizó la ecuación general de segundo grado:

$$ax^2 + bx + c = 0, \text{ donde } X_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \text{ y al sustituir valores, queda de la siguiente manera:}$$

$$\text{Acetona ppm} = \frac{-0.1509 + \sqrt{0.1509^2 - 4(-0.0046)(0.9626 - VRL)}}{2(-0.0046)},$$

para concentraciones de 0 a 10 ppm y

$$\text{Acetona ppm} = \frac{VRL - 1.8}{0.02}, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

Cabe aclarar que se tomó el valor positivo de la raíz ya que al tener dos posibles soluciones, el valor de la raíz negativa caía fuera del intervalo.

Dado que las unidades requeridas son $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es necesario realizar una conversión de partes por millón a microgramos por metro cúbico mediante la siguiente ecuación que considera condiciones estándar de temperatura y presión:

$$Y \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{X \text{ ppm } (PM)(1000)}{24.45}$$

Donde Y es el resultado en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, X es la concentración en ppm, PM es el peso molecular en g/mol y 1000 es un factor de conversión de mg a μg . [6]

Utilizando la ecuación anterior y sabiendo el peso molecular de la acetona, que es $PM = 58.08 \text{ g/mol}$, para 1ppm nos queda:

$$2375 \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{1 \text{ ppm } (58.08 \text{ g/mol})(1000)}{24.45}$$

Con lo que nos queda un factor de conversión por cada parte por millón calculada con las fórmulas anteriormente obtenidas, quedando finalmente:

$$\text{Acetona } \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{-0.1509 + \sqrt{0.1509^2 - 4(-0.0046)(0.9626 - \text{VRL})}}{2(-0.0046)} \quad (2375),$$

para concentraciones de 0 a 10 ppm (0 a 2V) y

$$\text{Acetona } \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{\text{VRL} - 1.8}{0.02} \quad (2375), \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm (2 a 2.8V).}$$

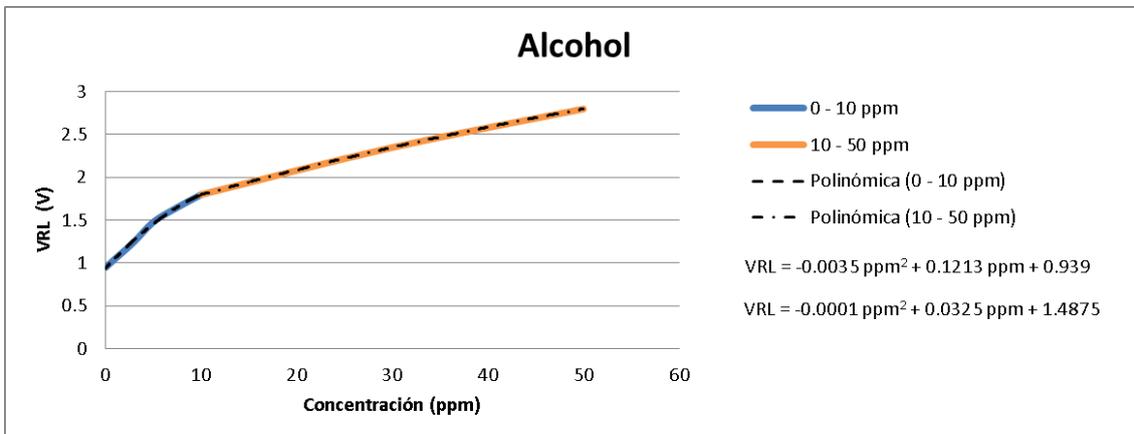


Fig. 94-b. Curva del voltaje de la resistencia de carga VRL en relación con la concentración de alcohol en ppm.

De forma similar, gracias a las líneas de tendencia generadas sobre la curva del voltaje de la resistencia de carga, se pudieron obtener las ecuaciones que determinan el comportamiento de dicho voltaje en todo el intervalo de respuesta al someter al sensor a distintas concentraciones de alcohol. Dichas ecuaciones se muestran a continuación:

$$\text{VRL} = -0.0035 \text{ ppm}^2 + 0.1213 \text{ ppm} + 0.939, \quad \text{para concentraciones de 0 a 10 ppm y}$$

$$\text{VRL} = -0.0001 \text{ ppm}^2 + 0.0325 \text{ ppm} + 1.4875, \quad \text{para concentraciones de 10 a 50 ppm.}$$

De las ecuaciones anteriores, empleando igualmente la ecuación general de segundo grado y sustituyendo en la fórmula, queda despejada la concentración de la siguiente manera:

$$\text{Alcohol ppm} = \frac{-0.1213 + \sqrt{0.1213^2 - 4(-0.0035)(0.939 - VRL)}}{2(-0.0035)},$$

para concentraciones de 0 a 10 ppm y

$$\text{Alcohol ppm} = \frac{-0.0325 + \sqrt{0.0325^2 - 4(-0.0001)(1.4875 - VRL)}}{2(-0.0001)},$$

para concentraciones de 10 a 50 ppm.

Aplicando la misma ecuación para convertir partes por millón a microgramos por metro cúbico y sabiendo que el peso molecular del alcohol es de 47.07 g/mol, para 1ppm queda:

$$1925 \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{1 \text{ ppm} (47.07 \text{ g/mol})(1000)}{24.45}$$

Y finalmente,

$$\text{Alcohol } \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{-0.1213 + \sqrt{0.1213^2 - 4(-0.0035)(0.939 - VRL)}}{2(-0.0035)} \quad (1925),$$

para concentraciones de 0 a 10 ppm (0 a 1.8V) y

$$\text{Alcohol } \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{-0.0325 + \sqrt{0.0325^2 - 4(-0.0001)(1.4875 - VRL)}}{2(-0.0001)} \quad (1925),$$

para concentraciones de 10 a 50 ppm (1.8 a 2.8V).

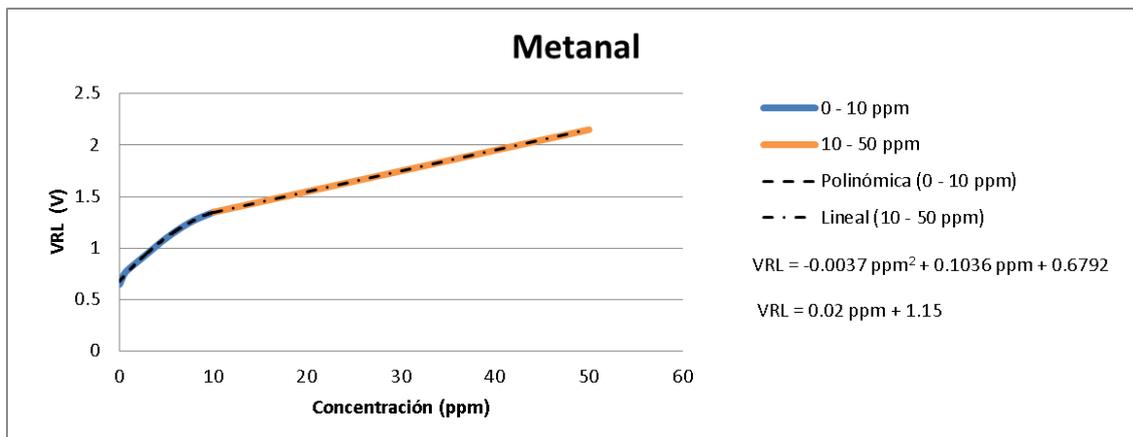


Fig. 94-c . Curva del voltaje de la resistencia de carga VRL en relación con la concentración de metanal en ppm.

Efectuando el mismo procedimiento que se ha realizado hasta el momento, se generó la curva de voltaje en la resistencia de carga VRL con respecto a la concentración de metanal a la que fue expuesto el sensor. Gracias a las líneas de tendencia se pudieron obtener las ecuaciones que determinan el voltaje de la resistencia de carga a lo largo de todo el intervalo de respuesta ante dicho gas. Las ecuaciones son las siguientes:

$VRL = -0.0037 \text{ ppm}^2 + 0.1036 \text{ ppm} + 0.6792$, para concentraciones de 0 a 10 ppm y

$VRL = 0.02 \text{ ppm} + 1.15$, para concentraciones de 10 a 50 ppm.

De las ecuaciones anteriores, empleando igualmente la ecuación general de segundo grado, sustituyendo en la fórmula y utilizando un poco de álgebra, se despejaron las concentraciones para ambos intervalos, quedando de la siguiente manera:

Metanal ppm = $\frac{-0.1036 + \sqrt{0.1036^2 - 4(-0.0037)(0.6792 - VRL)}}{2(-0.0037)}$, para concentraciones de 0 a 10 ppm y

Metanal ppm = $\frac{VRL - 1.15}{0.02}$, para concentraciones de 10 a 50 ppm.

Aplicando la misma ecuación de conversión y sabiendo que el peso molecular del Metanal es 30.03 g/mol, para 1ppm queda:

$$1228 \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{1 \text{ ppm} (30.03 \text{ g/mol})(1000)}{24.45}$$

Y finalmente,

Metanal $\mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{-0.1036 + \sqrt{0.1036^2 - 4(-0.0037)(0.6792 - VRL)}}{2(-0.0037)} (1228)$, para concentraciones de 0 a 10 ppm (0 a 1.35V) y

Metanal $\mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{VRL - 1.15}{0.02} (1228)$, para concentraciones de 10 a 50 ppm (1.35 a 2.15V).

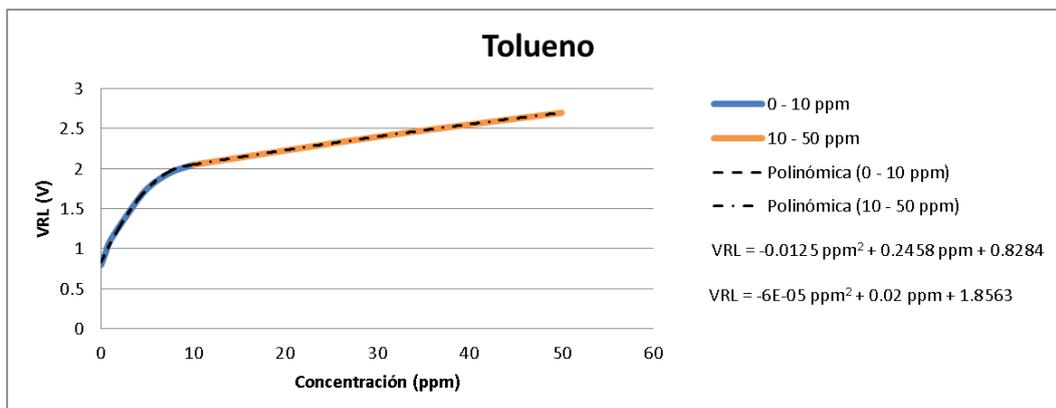


Fig. 94-d. Curva del voltaje de la resistencia de carga VRL en relación con la concentración de tolueno en ppm.

Finalmente, se generó la curva del voltaje de la resistencia de carga con respecto a la concentración de tolueno a la que fue expuesto el sensor y una vez más, gracias a las líneas de tendencia se pudieron obtener las ecuaciones que determinan el comportamiento del voltaje de dicha resistencia a lo largo de todo el intervalo de respuesta del sensor. Dichas ecuaciones se muestran a continuación:

$VRL = -0.0125 \text{ ppm}^2 + 0.2458 \text{ ppm} + 0.8284$, para concentraciones de 0 a 10 ppm y

$VRL = -6 \times 10^{-5} \text{ ppm}^2 + 0.02 \text{ ppm} + 1.8563$, para concentraciones de 10 a 50 ppm.

De las ecuaciones anteriores, empleando igualmente la ecuación general de segundo grado y sustituyendo en la fórmula, queda despejada la concentración de la siguiente manera:

$$\text{Tolueno ppm} = \frac{-0.2458 + \sqrt{0.2458^2 - 4(-0.0125)(0.8284 - VRL)}}{2(-0.0125)},$$

para concentraciones de 0 a 10 ppm y

$$\text{Tolueno ppm} = \frac{-0.02 + \sqrt{0.02^2 - 4(-6 \times 10^{-5})(1.8563 - VRL)}}{2(-6 \times 10^{-5})},$$

para concentraciones de 10 a 50 ppm.

Aplicando la misma ecuación de conversión y sabiendo que el peso molecular del tolueno es de 92.14 g/mol, para 1ppm queda:

$$3768 \mu\text{g}/\text{m}^3 = \frac{1 \text{ ppm} (92.14 \text{ g/mol})(1000)}{24.45}$$

Y finalmente,

$$\text{Tolueno ppm} = \frac{-0.2458 + \sqrt{0.2458^2 - 4(-0.0125)(0.8284 - VRL)}}{2(-0.0125)} \quad (3768),$$

para concentraciones de 0 a 10 ppm (0 a 2.05V) y

$$\text{Tolueno ppm} = \frac{-0.02 + \sqrt{0.02^2 - 4(-6 \times 10^{-5})(1.8563 - VRL)}}{2(-6 \times 10^{-5})} \quad (3768),$$

para concentraciones de 10 a 50 ppm (2.05 a 2.7V).

Hasta este punto se tenía la capacidad de poder interpretar las señales de los sensores y convertirlas en valores numéricos que reflejan el comportamiento de las variables de confort, sin embargo, los límites permisibles o puntos de control establecidos por los requerimientos de las pruebas no podían ser utilizados debido a la inercia de cada habitáculo. Con base en lo anterior y debido a que no se contaba con un modelo matemático del comportamiento de cada habitáculo considerando cada una de las variables, se decidió tomar puntos arbitrarios de control diferentes a los requerimientos de la competencia con el fin de amortiguar los valores de dichas variables. Los puntos de control se detallan a continuación.

5.1.2 Valores Objetivo

- Temperatura objetivo (T_{obj})

Dado que el sistema no contaba con un sistema activo para calentar los habitáculos, únicamente se consideró el valor superior del intervalo de obtención de puntos, particularmente dentro de la región de puntos reducidos, quedando este punto de control de la siguiente manera:

$$T_{obj} = T_i + 1 \text{ } ^\circ\text{C},$$

Donde T_i es la temperatura objetivo diaria al interior de los habitáculos.

- Humedad Relativa objetivo (HR_{obj})

En cuanto a esta variable fueron considerados ambos extremos del intervalo de máximo puntaje comprendido entre 40% y 55%, para el cual se contempló el intervalo interior de 43% a 52%, quedando:

$$HR_{obj} = 43 < HR < 52$$

- Concentración de dióxido de carbono objetivo (CO_2_{obj})

Para esta variable los requerimientos del concurso marcaban 880 ppm como punto máximo para obtener la mayor cantidad de puntos para esta sub competencia. Con lo anterior, se determinó que para obtener dichos puntos no era suficiente estar por debajo de ese límite sino considerar uno antes para amortiguar los niveles en caso de seguir incrementando. Para lo cual se determinó un valor objetivo de 600 ppm, quedando:

$$CO_2_{obj} = 600\text{ppm}$$

- Concentración de compuestos orgánicos volátiles objetivo (VOC_{obj})

De la misma manera, los requerimientos del concurso marcaban como límite superior una concentración de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de formaldehído o metanal para tener la mayor cantidad de puntos en esta sub prueba. Con lo que se estableció como valor objetivo una concentración de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, quedando:

$$VOC_{obj} = 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

Para nuestro sensor se consideró esta concentración para cualquiera de los compuestos orgánicos volátiles que detecta y no únicamente para el metanal.

- Concentración de monóxido de carbono objetivo (CO_{obj})

Dado que esta variable fue medida de manera adicional, se consideraron los valores máximos permitidos por la norma oficial mexicana NOM-021-SSA1-1993 [22], la cual establece un máximo de 11 ppm de monóxido de carbono, sin embargo, se consideró un valor inferior al máximo considerando la inercia que pudieran tener los habitáculos y se eligió un valor de 8 ppm, quedando:

$$CO_{obj} = 8 \text{ ppm}$$

- Concentración de ozono objetivo (O_{3obj})

Finalmente, al igual que con el gas anterior se buscó en la norma oficial mexicana los valores máximos permitidos y basándose en la NOM-020-SSA1-1993 [21], el valor máximo es de 110 ppb. Teniendo en cuenta las mismas consideraciones, se estableció un valor objetivo de 80 ppb, quedando:

$$O_{3obj} = 80 \text{ ppb}$$

Cabe mencionar que para las concentraciones de gas se consideró un valor objetivo del 70% del valor máximo, considerando la inercia de dichas variables y el tiempo en que los niveles comenzaran a disminuir. Se consultó una tabla en donde se muestran los valores recomendados según las normas mencionadas anteriormente. [58]

5.1.3 Programación y Simulación

Una vez teniendo toda esta información, el paso que seguía era ponerla a prueba, para lo que era necesario convertir los diagramas de flujo que se generaron con anterioridad en líneas de código o configuraciones que representaran las mismas condiciones expuestas en dichos diagramas. Esta tarea se llevó a cabo en dos etapas independientes; una referente al sistema de control de iluminación, y la otra referente al sistema de medición.

5.1.3.1 Sistema de control de iluminación Clipsal

El sistema Clipsal cuenta con una interfaz PC-USB, mediante la cual es posible una comunicación entre una computadora y los componentes de dicho sistema. Como se mencionó anteriormente, el sistema cuenta con componentes distribuidos en toda la casa, para lo cual se probó inicialmente un conjunto de componentes relacionados a una habitación, particularmente la recámara, donde se encuentra un sensor de presencia, un sensor de iluminación interior y un teclado, quienes van relacionados con un canal de dimmer y uno de relevador, ambos ubicados en la banca técnica. Para fines de pruebas se seleccionaron dichos componentes, además de la interfaz para comunicarlos con la computadora y el software de programación.

El software mencionado anteriormente se llama C-Bus Toolkit, mediante el cual se puede configurar uno a uno, los componentes detectados en la red. En la figura 95 se muestra una captura de pantalla de la interfaz de dicho software.

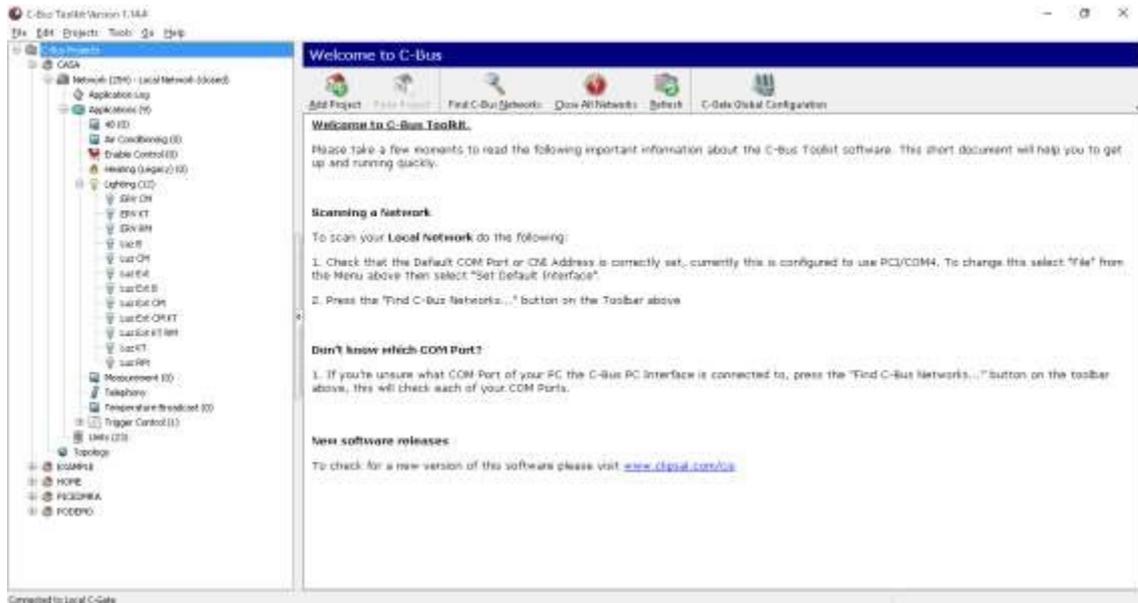


Fig. 95. Interfaz de programación C-Bus Toolkit.

De la figura anterior se pueden apreciar dos áreas principales; el árbol de proyectos y aplicaciones (izquierda), y el área de trabajo y configuración (derecha). En el árbol de proyectos se muestran los proyectos almacenados, varios de ellos de pruebas o ejemplos proporcionados por el desarrollador y el que se utiliza actualmente llamado CASA. Dentro de este proyecto se encuentran varias ramas de interés; la de la red, que nos informa el estado de la misma; las aplicaciones, que muestra las variables utilizadas según su categoría como aire acondicionado, iluminación, medición, etc.; y las unidades, en donde se puede tener acceso a la configuración de los componentes conectados a la red. En la figura 96 se muestra un acercamiento a esta área.



Fig. 96. Área del árbol de proyectos y aplicaciones de la interfaz C-Bus Toolkit.

Dentro de las aplicaciones tenemos la de iluminación (Lighting), en donde se despliegan las variables utilizadas para el control de iluminación, donde ERV hace referencia a la variable que activa el relevador que enciende el ERV y Luz hace referencia a la variable utilizada para controlar ya sea con dimmer o relevador, la iluminación mostrada. CM, KT y RM hacen referencia a “Community”, “Kitchen” y “Room”, y Ext hace referencia al exterior.

Al hacer clic sobre alguna de estas variables, se despliega en el área de trabajo y configuración, la información relacionada a la misma como se muestra en la figura 97.

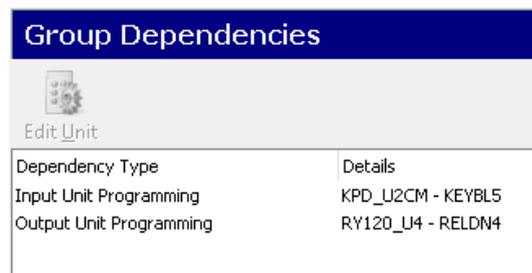


Fig. 97. Información de la variable ERV CM, en donde se muestra la unidad de programación de entrada, correspondiente al teclado y la unidad de programación de salida, correspondiente a un relevador. En otras palabras, se muestra la unidad de donde se activa a la variable y la unidad que es controlada con dicha activación.

En la sección de unidades, se tiene acceso a la programación directa de la unidad una vez incorporada a la base de datos, en donde se configura su comportamiento y se

generan las variables mencionadas anteriormente, las cuales por ejemplo para un relevador, son el nombre de las salidas a controlar como se muestra en la figura 98-a y 98-b.

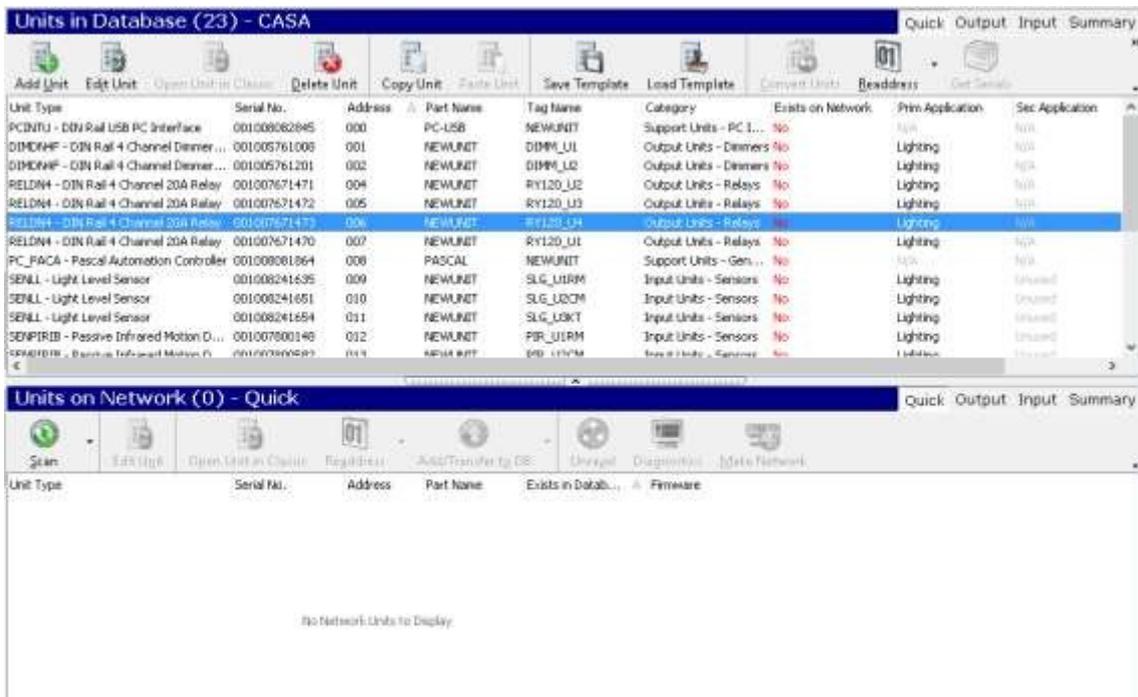


Fig. 98-a. Listado de las unidades en la base de datos, las cuales para ser configuradas, se tienen que agregar a la red mediante el botón “Add Unit”.

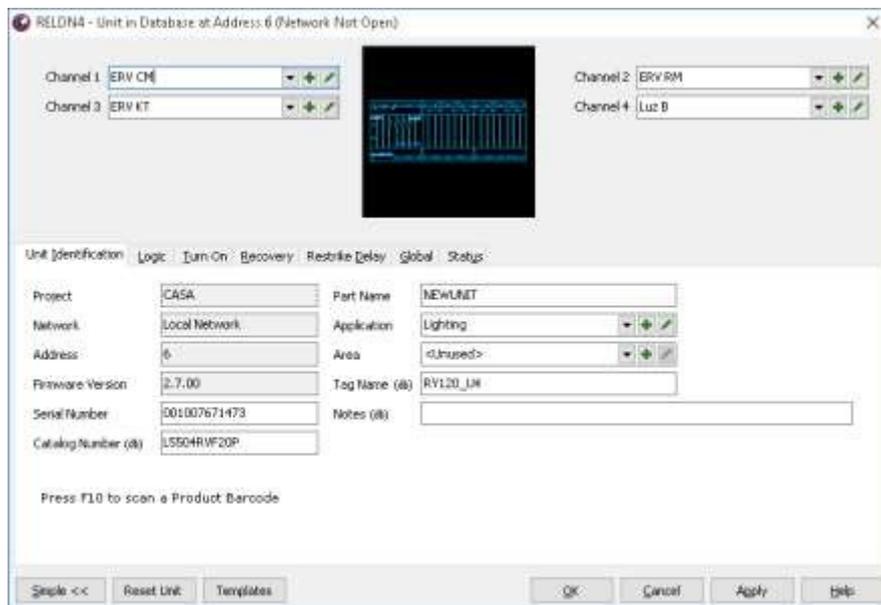


Fig. 98-b. Ventana de configuración de un relevador de cuatro canales de Clipsal.

En la ventana de configuración se generan las variables relacionadas a cada canal del relevador, las cuales van a ser utilizadas desde los teclados o acopladores de bus. Las pestañas relevantes son las de la identificación de la unidad y la de lógica, en donde se configura la lógica del comportamiento de los canales.

En cuanto al sensor de presencia, cuenta con más de una configuración, ya que involucra una variable a activar, una función a la que responde, un cierto nivel de iluminación y una lógica de ocupación. La ventana de configuración para este sensor se muestra en la figura 99.

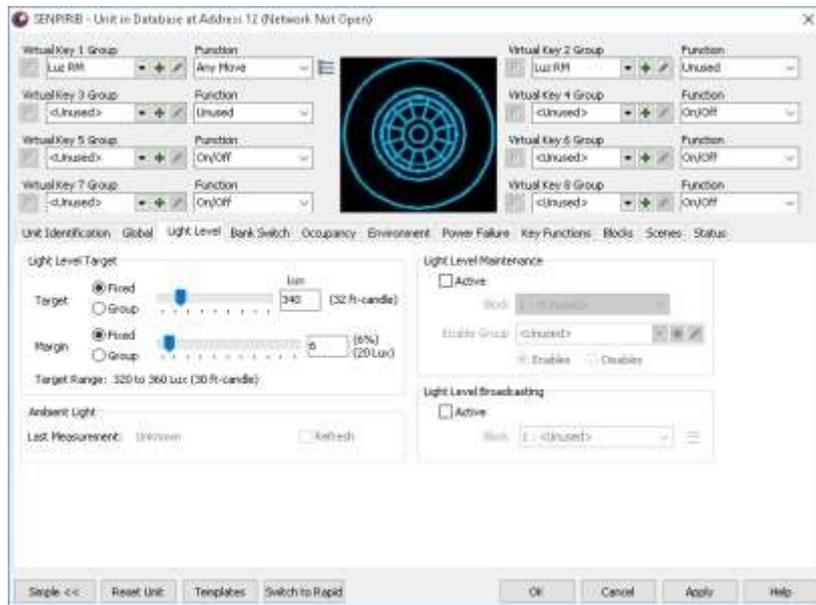


Fig. 99. Ventana de configuración para el sensor de presencia de Clipsal.

Otro componente importante es el sensor de iluminación interior, el cual con ayuda del sensor de presencia, controla el encendido y apagado de la iluminación en caso de no contar con la suficiente iluminación natural. La ventana de configuración de este sensor se muestra en la figura 100

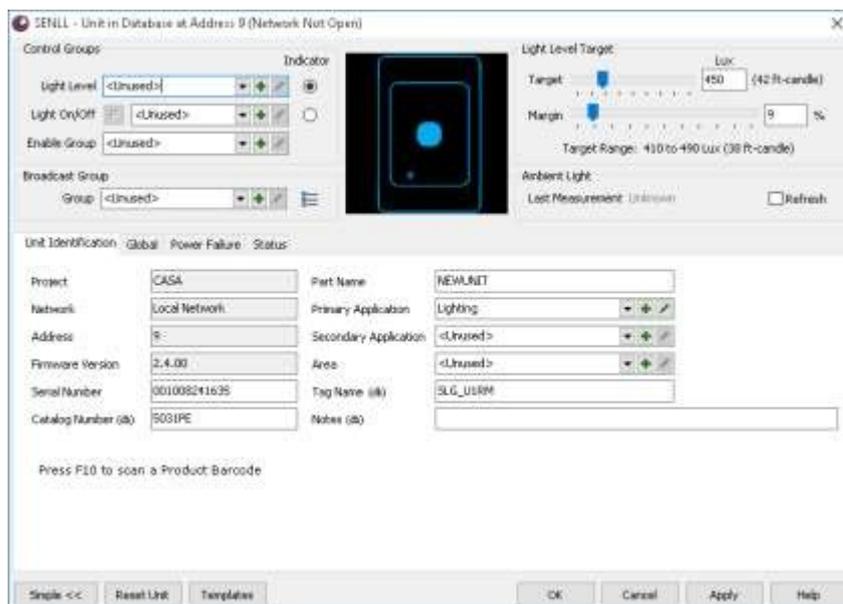


Fig. 100. Ventana de configuración del sensor de iluminación interior y exterior.

Del lado izquierdo de la figura anterior se puede ver la sección de control de grupos, en donde se seleccionan las variables o grupos a controlar con el nivel de iluminación medido por el sensor. Este sensor cuenta con una medición objetivo, la cual es regulada con un control del lado derecho, donde también se puede seleccionar un margen de activación en porcentaje, lo que crea una ventana de activación para la variable a controlar mediante este sensor.

Entre los componentes más importantes se encuentran los teclados Saturn DLT, los cuales son una de las interfaces con el usuario mediante la cual se pueden controlar de forma manual las variables asociadas a la iluminación y ventilación en cada habitación. La ventana de configuración para el teclado se muestra en la figura 101.

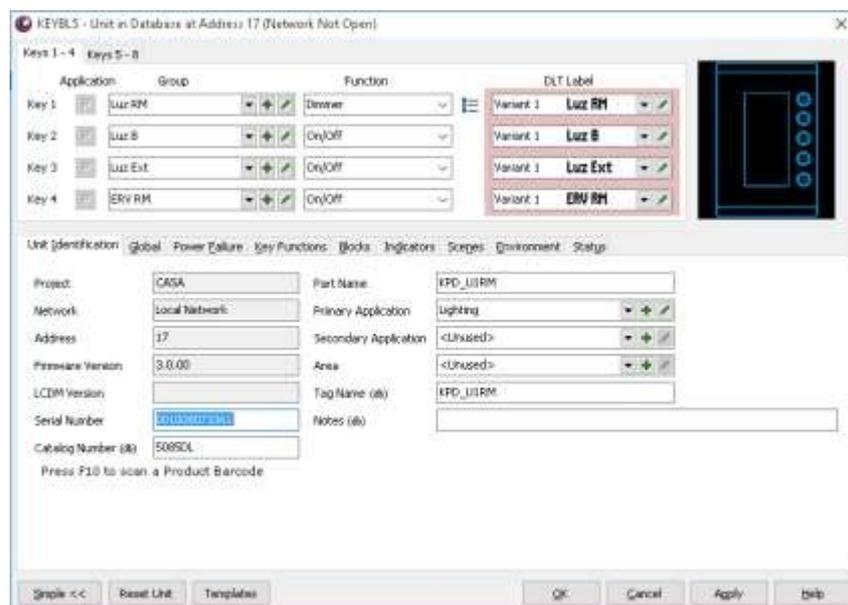


Fig. 101. Ventana de configuración del teclado Saturn DLT.

Dentro de las configuraciones importantes se encuentra la función de cada botón así como su etiqueta, esta última aparecerá en la pantalla del teclado. Esta ventana cuenta con varias secciones importantes: una sección llamada Key Function; para configurar el comportamiento de cada botón, otra llamada Blocks; para configurar la lógica de activación por bloques, una llamada Indicators; para seleccionar el comportamiento de los indicadores de los botones y Scenes, para editar escenas a utilizar.

Otro componente importante es el sensor de temperatura, ya que a través de éste se activa el ERV de la cocina, el cual reduce un poco la temperatura y ventila la habitación, mejorando la calidad del aire. La ventana de configuración del sensor de temperatura se muestra en la figura 102.

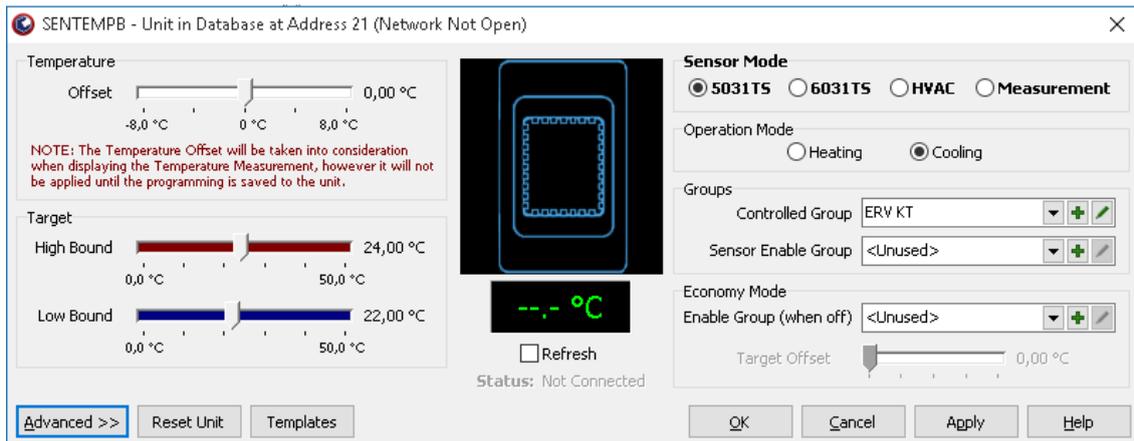


Fig. 102. Ventana de configuración del sensor de temperatura.

Este sensor tiene la ventaja de poder configurarse en varios modos; Medición, para únicamente registrar la temperatura de la habitación; HVAC, para aplicaciones con equipo de calefacción y aire acondicionado compatible con C-Bus; 6031TS, para aplicaciones con sistemas de control de temperatura y 5031ST, el cual simplemente activa o desactiva un grupo o variable de control, en este caso el ERV de la cocina, mediante una ventana de operación ajustada por un límite inferior y uno superior. En este modo, el sensor cuenta con un modo de calefacción y uno de enfriamiento, lo que se refleja en el comportamiento de la variable a controlar, en modo de enfriamiento se activa la variable al rebasar el límite superior y se desactiva al llegar al límite inferior, y viceversa para el modo de calefacción.

Finalmente, se configuró el acoplador de bus, tal vez el elemento más importante para nuestra integración ya que como se comentó anteriormente, comunica al sistema de monitoreo con Clipsal mediante una señal de contacto seco. La ventana de configuración del acoplador de bus se muestra en la figura 103.



Fig. 103. Ventana de configuración del acoplador de bus.

En la ventana de configuración, se puede seleccionar la variable o grupo a activar cuando se presente la señal de contacto seco para cada uno de los cuatro canales, así como su función. Dentro de las secciones importantes se encuentran: Key Function, en donde se configura el comportamiento de la señal de entrada; Blocks, para la lógica de activación de bloques; Indicators, para el comportamiento del indicador LED y Scenes, donde se seleccionan las escenas a utilizar.

Con el fin de garantizar una correcta programación de Clipsal, se puso a prueba cada conjunto de componentes por separado y finalmente, se conectaron todos para ponerlos a prueba ante un escenario lo más real posible ya que en el museo universitario contemporáneo de arte (MUCA), no se terminó de construir el prototipo.

Una de las últimas pruebas con el sistema de control de iluminación fue con la interfaz Wiser, la cual involucra tanto hardware, un módem inalámbrico que comunica a los dispositivos móviles con Clipsal, como software, el cual permite al usuario controlar directamente las variables como la iluminación interior, exterior o ventilación de cada habitáculo.

La programación de esta interfaz se hace mediante un software llamado Piced (Programming Interface for C-Bus Embedded Devices) que significa Interfaz de Programación para Dispositivos Embebidos de C-Bus, la imagen de inicio de esta interfaz se muestra en la figura 104.



Fig. 104. Imagen de inicio de la interfaz de programación Piced de Schneider Electric.

Gracias a este software se puede diseñar la interfaz de control de la aplicación para dispositivos móviles llamada Wiser Home Management, desde la cual se pueden visualizar y gestionar diversas aplicaciones como el consumo de energía, el costo del consumo, termostatos, producción fotovoltaica, sistema de carga para automóviles eléctricos y control de cargas. Una imagen de esta aplicación para Android se muestra en la figura 105.



Fig. 105. Pantalla de interfaz de la aplicación Wisier Home Management en Android.

Gracias a esta aplicación se puede tener una administración y visualización de variables que intervienen en el confort y en el ahorro tanto de energía como de recursos económicos.

5.1.3.2 Sistema de monitoreo

El sistema de monitoreo se compone de dos subsistemas; el sistema de medición que consta de los sensores para medir las variables de confort, y el sistema de comunicación, que enlaza a los módulos de monitoreo con el módulo de control. El sistema de comunicación fue diseñado por el Ing. Carlos Canchola Hernández, mediante la implementación de radios Xbee programados gracias a un USB Explorer Dongle, el cual sirve para comunicar a cada Xbee con el software de configuración X-CTU y se muestra en la figura 106.



Fig. 106. USB Explorer Dongle para programación del Xbee. [59]

Como se mencionó en la sección 4.7, se destinaron dos Xbee para cada módulo de monitoreo debido a la cantidad de entradas y salidas, y uno en el módulo de control en

la banca técnica, dando en total 7 Xbee, los cuales fueron configurados como routers y como coordinador, respectivamente.

Para el módulo de control se implementó un microcontrolador PIC 16f887 comunicado al Xbee coordinador, el cual le reportaba los estados de los sensores de cada habitáculo para posteriormente ser comparados con los valores objetivo y según fuera su valor, tomar decisiones para generar señales de control mediante las salidas digitales conectadas a los optoacopladores y estos a su vez conectados a las entradas de los acopladores de bus de Clipsal.

La programación del microcontrolador se realizó en la interfaz de programación PIC C de la compañía CCS (Custom Computer Services), cuya imagen de información del menú de ayuda se muestra en la figura 107.

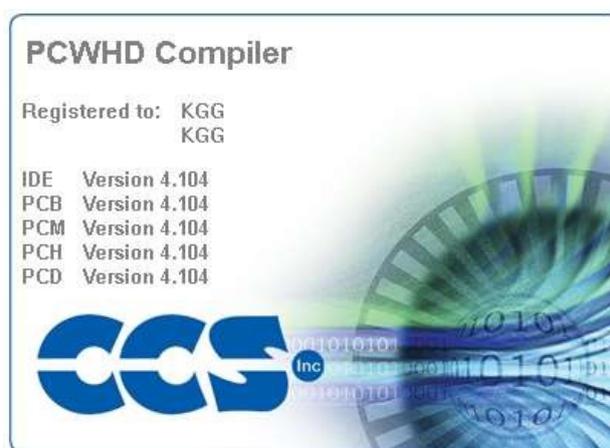


Fig. 107. Imagen de información del menú de ayuda del compilador PIC C.

Esta interfaz tiene la ventaja de utilizar lenguaje C para la programación de microcontroladores PIC, lo cual facilita el código en comparación al lenguaje ensamblador, el cual consiste en una lista de instrucciones y comandos propios del microcontrolador.

El código desarrollado y utilizado en el microcontrolador sigue la lógica generada en el diagrama de flujo de la sección 4.7 de este trabajo y puede consultarse con detalle y comentarios en el anexo 7 (código del microcontrolador del módulo de control). Cabe aclarar que en el código propuesto en el anexo 7 se utilizó el PIC 16F917 por limitaciones de memoria RAM y ROM.

5.1.3.3 Simulación

La forma más sencilla de poner a prueba el código generado hasta el momento es mediante el simulador ISIS Proteus, el cual permite interconectar componentes de una forma incluso más sencilla que sobre protoboards, que son tarjetas para probar de manera sencilla y sin soldar, circuitos electrónicos.

El software mencionado anteriormente sustituye alambres por líneas, ahorrando tiempo y esfuerzo, con el fin de llevar a la protoboard dicho diseño una vez que funcione a la perfección en el simulador para probarlo físicamente antes de manufacturar un circuito impreso. Este software posee una gran variedad de componentes y herramientas que permiten llevar a cabo casi cualquier simulación de manera sencilla, como librerías de componentes que abarca desde una resistencia hasta displays y microcontroladores. En la figura 108 se muestra una imagen de dicho software con la simulación para el módulo maestro y tres módulos de monitoreo.

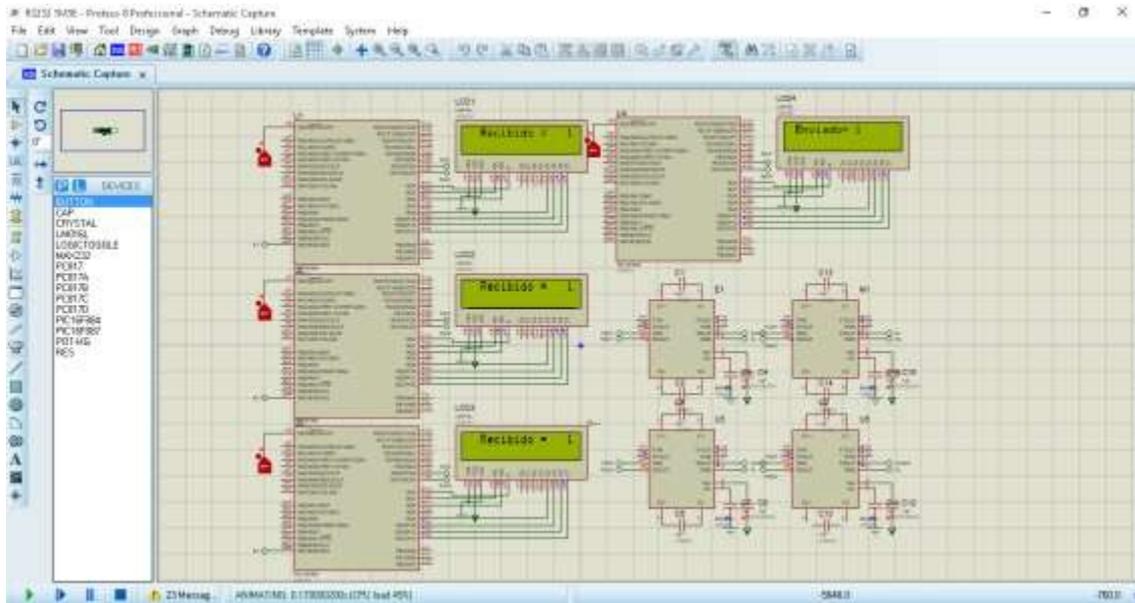


Fig. 108. Simulación en ISIS Proteus 8 del módulo maestro y tres módulos de monitoreo.

Debido a las limitaciones del software al no contar con una librería para poder simular los transceptores Xbee, se sustituyeron por un microcontrolador y un max232 para fines de simulación. Cabe destacar que el uso de los displays fue con el fin de poder visualizar la información enviada y recibida, y así poder determinar e identificar en qué punto del código tenía imperfectos.

5.1.4 Pruebas en protoboard

Una vez que se tuvieron resultados aceptables en la simulación, se trasladó del simulador a la realidad al montar los componentes sobre protoboards y una vez realizado su respectivo alambrado se llevó a cabo una serie de pruebas finales, antes de iniciar el proceso de manufactura. En la figura 109-a a 109-d se muestran las pruebas finales tanto para algunos sensores como para los módulos.



Fig. 109-a. Pruebas del sensor de temperatura contra uno analógico comercial.



Fig. 109-b. Pruebas del sensor de temperatura contra uno digital comercial.



Fig. 109-c. Pruebas del sensor de humedad contra uno analógico comercial.

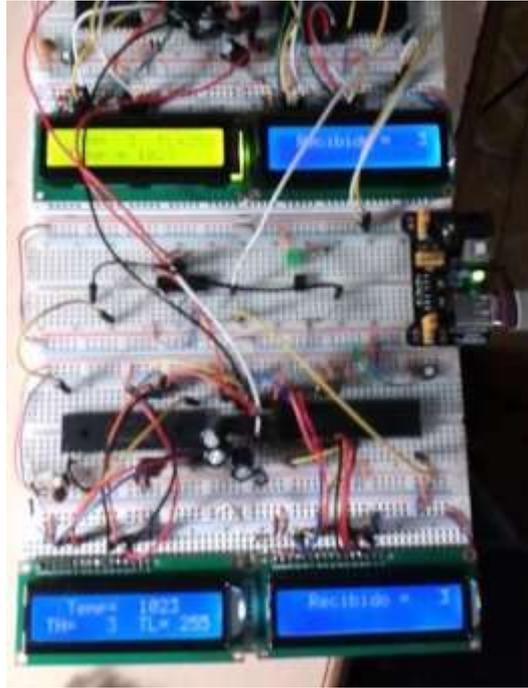


Fig. 109-d. Pruebas de comunicación entre el módulo maestro y tres módulos de monitoreo.

5.2 *Manufactura*

Finalmente, una vez verificado el correcto funcionamiento de todos los componentes por separado y posteriormente todos en conjunto, se inició el proceso de manufactura de las PCB (Printed Circuit Board) o circuitos impresos para el montaje de los componentes y su fijación mediante soldadura.

Para este proceso se cotizó realizar los circuitos impresos a través de una compañía especializada con el fin de garantizar un acabado adecuado, además de los tratamientos necesarios contra interferencias electromagnéticas. Sin embargo, tras conocer el costo y los tiempos de entrega se decidió manufacturar las tarjetas por nuestra cuenta con el fin de tenerlas a tiempo y reducir costos.

La manufactura de las tarjetas se realizó gracias a la herramienta ARES del software Proteus de Labcenter Electronics, el cual además de simular circuitos electrónicos posee la capacidad de generar las pistas o trayectorias que interconectan los componentes de cualquier circuito para su manufactura.

Para la manufactura de los circuitos impresos, se eligieron placas fenólicas, las cuales tienen de un lado un recubrimiento de cobre, que al ser sumergido en una solución de cloruro férrico (FeCl_3) diluido con agua, se disuelve. Para lograr que las pistas soporten el ataque químico, el circuito se imprime mediante una impresora láser sobre papel encerado o couche para posteriormente ser transferido a la tarjeta al ser planchado durante unos minutos, una vez que se tiene el circuito sobre la placa, se sumerge en la solución durante cerca de diez minutos, removiendo el cobre que no quedó protegido

por el tóner, finalmente se limpian los residuos del tóner que quedó sobre las pistas para poder soldarlas adecuadamente.

Cabe mencionar que el trabajo de diseño para los módulos fue desarrollado por el Ing. Carlos Canchola Hernández y el trabajo aquí presentado incluye una descripción del proceso de manufactura, sin embargo, se incluye una versión mejorada del módulo de control, la cual contempla detalles que surgieron después de esta etapa de prototipado y pruebas en el lugar de competencia.

5.2.1 Manufactura de los módulos de monitoreo

Dado que se tenían limitaciones en cuanto al tamaño dentro del muro para ser intervenido, se tuvo que adaptar el diseño a las restricciones de dichas dimensiones. El espacio libre del muro entre el fondo y la hoja del muro interior fue de 11cm. Con esta restricción de profundidad y sabiendo que se tenía que proteger un poco el módulo, se utilizaron gabinetes de plástico de la marca Steren, de 18.7 cm de largo por 10.7 cm de ancho y 5.7 cm de profundidad, ya que era el gabinete que mejor se adaptó a nuestras limitaciones y necesidades.

Con base en lo anterior, se tuvo que dividir el circuito impreso por etapas con el fin de poder ser contenido en el gabinete y por otro lado, para poder reemplazar una parte del mismo y no su totalidad, en caso de presentar alguna falla o daño.

El circuito del módulo de monitoreo se dividió en las siguientes tres etapas:

- Alimentación, que incluía la etapa de filtrado, protección y rectificación del voltaje de alimentación de 110 VAC.
- Regulación, que abarcaba tanto la etapa de regulación y un segundo filtrado para alimentar a los sensores, como el soporte de los mismos e indicadores LED para cada regulador.
- Adquisición y comunicación, que era la etapa en la cual se alimentaban y soportaban los transeptores Xbee y se conectaban con los sensores.

En las figuras 110-a a 110-e se muestran las etapas y su manufactura en el laboratorio de instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM.



Fig. 110-a. Manufactura de los módulos de monitoreo.



Fig. 110-b. Manufactura de la etapa de alimentación.

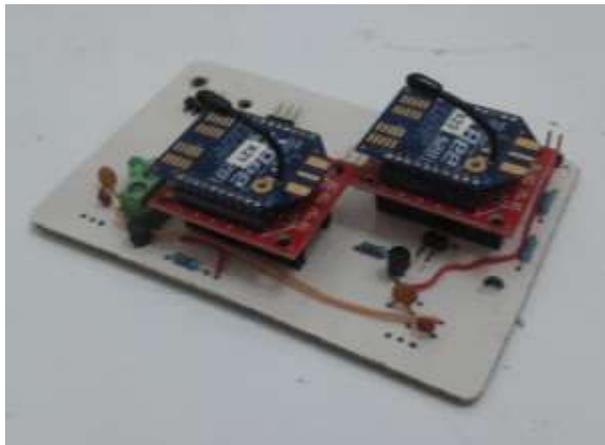


Fig. 110-c. Manufactura de la etapa de adquisición y comunicación.



Fig. 110-d. Manufactura de la etapa de regulación.

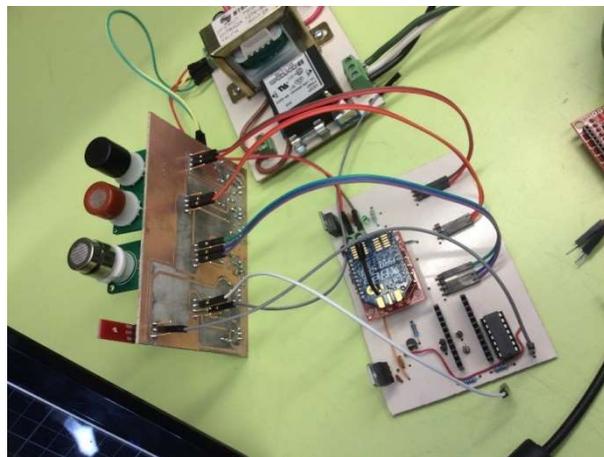


Fig. 110-e. Conexión del módulo de monitoreo previo a su montaje.

5.2.2 Manufactura del módulo de control

Debido a que el módulo maestro se encontraba en la banca técnica y al tener más espacio, se tuvo la libertad de escoger un gabinete más amplio y por ende, se manufacturó un solo circuito, el cual contenía la etapa de comunicación, procesamiento y control. La etapa de alimentación para este módulo se replicó de la ya manufacturada para los módulos de monitoreo.

En cuanto al microcontrolador utilizado para las pruebas, se utilizó el PIC16F887, que es muy similar al 16F884 y un circuito impreso desarrollado por el M. en I. Ulises Peñuelas, el cual permite la programación directa a través de un bootloader y la interfaz Tiny Bootloader, con el fin de no tener que montar y desmontar el microcontrolador para ser grabado mediante un grabador universal o un PICKit. En la figura 111 se muestra dicho circuito.



Fig. 111. Circuito impreso con microcontrolador PIC 16F887 e interfaz USB desarrollado por el M en I Ulises Peñuelas.

De igual forma que con los módulos de monitoreo y gracias a la herramienta ARES del simulador de circuitos Proteus, se generó el diagrama de las pistas para la manufactura del circuito impreso del módulo de control, en la figura 112 se muestra la interfaz con dicho diagrama previo a su manufactura.

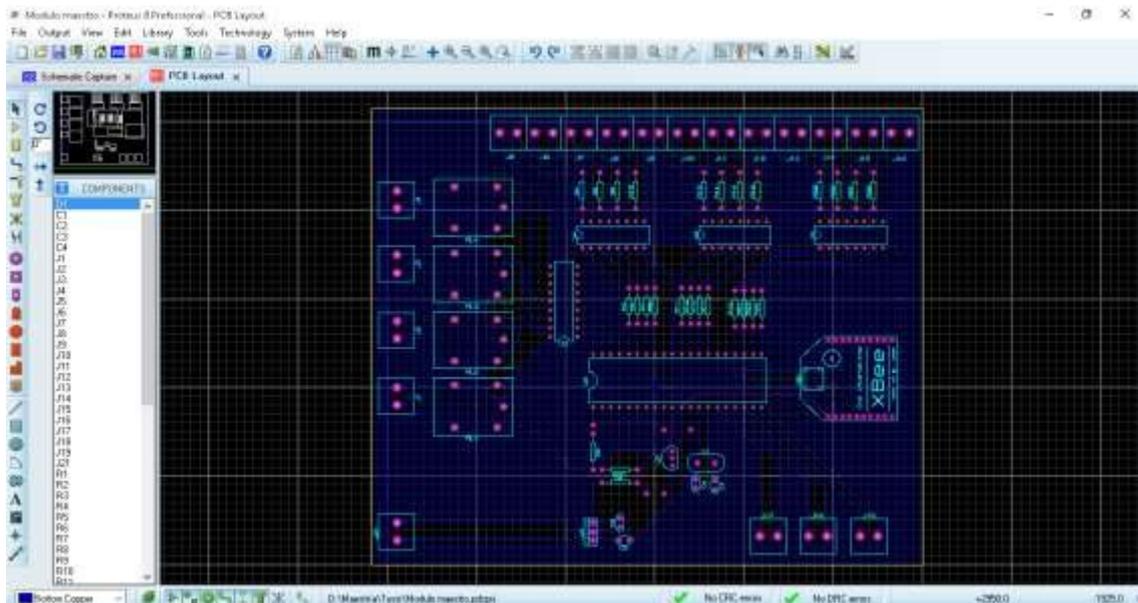


Fig. 112. Interfaz de la herramienta ARES en Proteus 8.

Una vez que se tiene el diagrama y se han corregido los errores que pueden generarse durante la conexión de los componentes, se puede generar un archivo de las diferentes capas del circuito; la capa de componentes, que corresponde a la silueta de cada componente a colocar y a los textos que se hayan agregado (azul claro de la figura 112); la capa inferior de pistas en azul marino) y la capa superior de pistas (rojo), que para este caso al ser únicamente dos pistas, se sustituyen por puentes para utilizar tarjetas de una sola cara de cobre. En la figura 113-a se muestra la imagen generada para los componentes del módulo maestro y en la figura 113-b se muestra la imagen generada para las pistas del mismo.

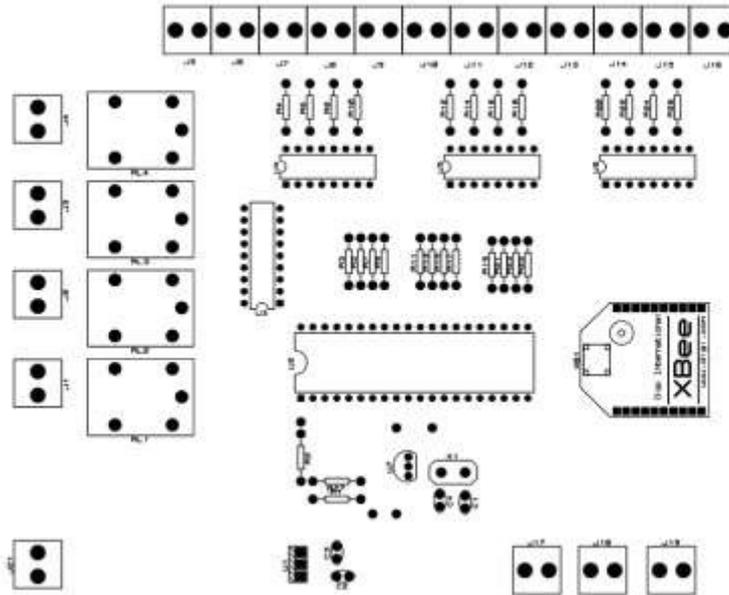


Fig. 113-a. Imagen de componentes a colocar al circuito impreso del módulo maestro.

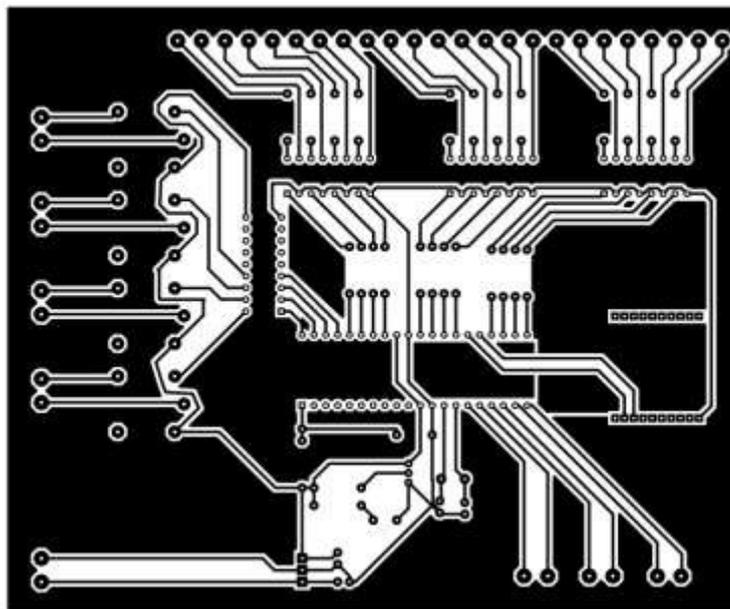


Fig. 113-b. Imagen de las pistas para el circuito impreso del módulo maestro.

Una vez impresas, se sigue el mismo procedimiento que para los circuitos de los módulos de monitoreo, que consiste en planchar las imágenes impresas sobre las placas de cobre para posteriormente someter dicha tarjeta a un ataque químico para remover el cobre no protegido y tener así las pistas del circuito impreso. Una vez que se tiene el circuito impreso, se barrenan las perforaciones necesarias mediante un taladro de banco para poder colocar los componentes sobre la tarjeta y soldarlos a la misma. En la figura 114-a se muestra el módulo de control con los componentes soldados y en la figura 114-b se muestra el módulo de control terminado.

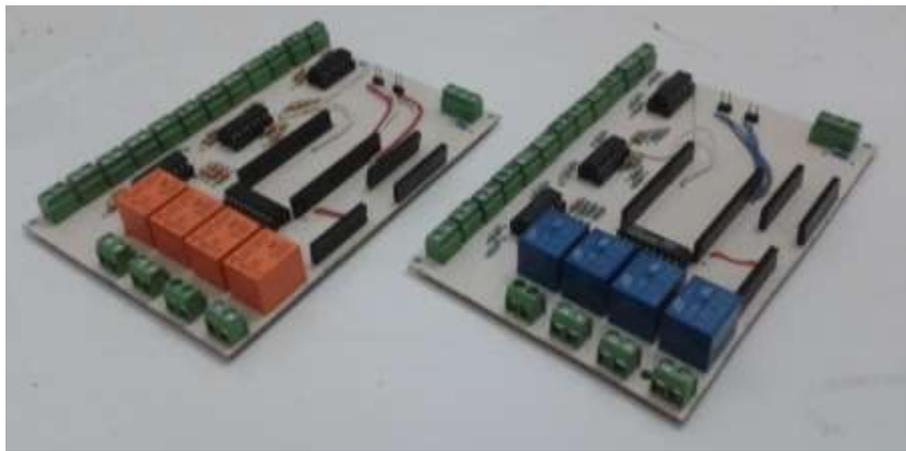


Fig. 114-a. Circuitos impresos del módulo de control con sus componentes soldados.

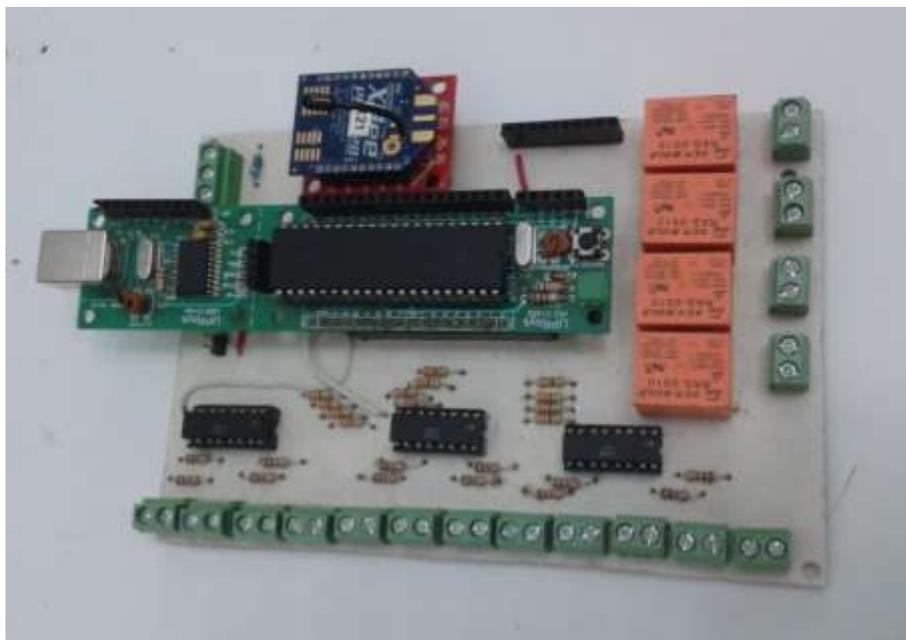


Fig. 114-b. Módulo de control terminado.

6 INSTALACIÓN E INTEGRACIÓN

La etapa final de este trabajo consistió en la instalación de los componentes del sistema antes descrito, los cuales constan del sistema de control de iluminación y del sistema de monitoreo. Para ambos sistemas fue necesario realizar una instalación de componentes previos a su montaje e instalación final.

6.1 Instalación del sistema de control de iluminación

Los requerimientos para instalar este sistema fueron relativos al montaje de los componentes del mismo y su respectiva conexión.

Dado que la mayoría de los componentes del sistema Clipsal son de montaje en muro o en techo, fue necesario realizar intervenciones en los mismos con el fin de cumplir con los requerimientos del fabricante para garantizar un funcionamiento adecuado del sistema.

La instalación se dividió en dos etapas: su construcción en el museo universitario de ciencias y artes (MUCA) y su construcción en el lugar del evento en Versalles, Francia.

El objetivo de esta primera etapa fue ahorrar tiempo de instalación en Versalles ya que se contaba con 10 días para construir en su totalidad el prototipo y se requería sincronizar muy bien todas las áreas con la finalidad de terminar a tiempo.

Gracias a que la interconexión de los componentes se realiza mediante un cable UTP-5 el cual energiza dichos componentes y además los comunica, fue necesario montar tubería de media pulgada para conducir dicho cable entre los componentes distribuidos en toda la casa. En la figura 115 se muestra la instalación en techo para el sensor de presencia, iluminación y ERV.



Fig. 115. Instalación de tubería en techo para sensores de presencia, iluminación y ERV.

Para la instalación en muros se utilizó chalupa estándar ya que dichos componentes están diseñados las mismas. Dichos componentes son el sensor de iluminación interior, el sensor de temperatura y los teclados Saturn. La preparación se muestra en la figura 116.

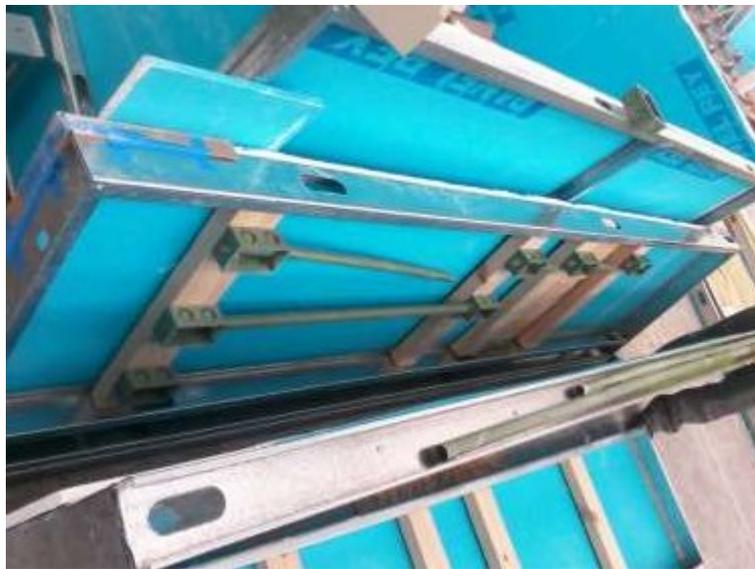


Fig. 116. Instalación de tubería y chalupas para sensores de iluminación interior, sensor de temperatura y teclados Saturn.

Durante esta etapa también se montó el tablero pragma de Schneider Electric así como los componentes del mismo, los cuales son: los bancos de dimmers, bancos de relevadores, interfaz PC-USB, controlador PASCAL, acopladores de bus y protecciones. Dicho tablero se muestra en la figura 117.



Fig. 117. Instalación del tablero de control de Clipsal (derecha).

Durante la etapa de construcción en Versailles se tendieron las líneas de tubería que comunicaban los componentes en los habitáculos con la banca técnica, lo cual implicó medir, cortar, colocar y sujetar dicha tubería para seguir la trayectoria definida. Dicha trayectoria contemplaba varios registros, ya que al dar más de dos quiebres a 90° se vuelve muy complicado cablear. Una vez colocada la tubería, se realizó el cableado de la misma mediante el uso de guías flexibles de plástico y finalmente se realizó la conexión de los componentes previo a su montaje. Una vez colocados los muebles, se pudo conectar el amplificador de audio y el módem inalámbrico Wiser. En la figura 118 se muestran los componentes de muro del sistema de control de iluminación Clipsal.



Fig. 118. Teclado Saturn, sensor de iluminación interior y sensor de temperatura de Clipsal.

6.2 *Instalación del sistema de control y monitoreo*

La instalación de este sistema fue relativamente más sencilla ya que durante la primera etapa de instalación solamente se colocó el gabinete del módulo de control en la banca técnica, el cual se posicionó encima del tablero de control de Clipsal.

Durante la segunda etapa se montaron los gabinetes de los módulos de monitoreo en los muros intervenidos, posteriormente se realizó el cableado de los mismos previo a las conexiones finales. En la figura 119 se muestra un módulo de monitoreo instalado en su posición final.



Fig. 119. Módulo de monitoreo instalado en el muro.

Una vez montados los circuitos correspondientes al módulo de control en su respectivo gabinete se realizó el cableado del sensor de temperatura para el agua caliente, de las electroválvulas para controlar el flujo de agua caliente proveniente del calentador solar y de los acopladores de bus para controlar los ERV. En la figura 120 se muestra el módulo de control instalado en la banca y el gabinete de monitoreo de la organización, a donde se encontraban conectados los termopares y sensores con los que fue evaluado el prototipo del equipo CASA UNAM.



Fig. 120. Instalación del módulo de control en la banca técnica (derecha arriba) y del gabinete de monitoreo de la organización (izquierda).

7 RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron el producto del trabajo en equipo de los más de 30 integrantes de distintas que conformaron el equipo CASA UNAM y aunque se logró terminar y entrar a la competencia con un día de retraso, se lograron resultados favorables considerando todas las dificultades e imprevistos y que fue la primera vez que un equipo mexicano y de la UNAM participaba. El prototipo terminado se muestra en las figuras 121-a y 121-b.



Fig. 121-a. Fachada del prototipo CASA UNAM instalado en Versailles, Francia.



Fig. 121-b. Vista de la cocina hacia el espacio comunitario (derecha), recámara (izquierda), banca técnica (negro) y torre hidráulica (fondo).

7.1 Resultados generales

Como se mencionó en el capítulo segundo de este trabajo, una parte de la organización se encargó de la medición cualitativa mediante jurados y de la cuantitativa mediante sensores distribuidos en la casa, con lo que se generaron puntajes independientes por categoría para que al ser sumados, se obtuviera un puntaje total. En la figura 122 se muestra la puntuación final para los veinte equipos que conformaron esta edición del Decatlón Solar obtenida de la página de internet del mismo.

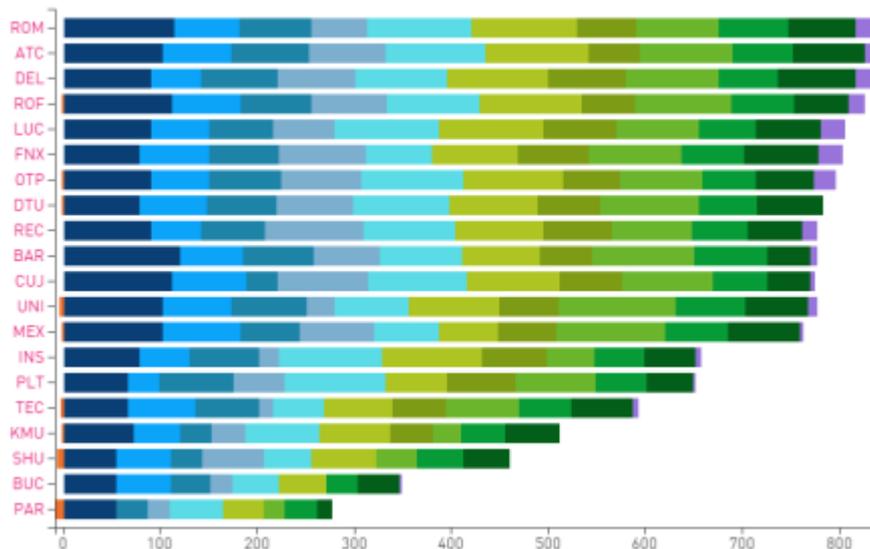


Fig. 122. Puntaje final de los veinte participantes ordenado de mayor a menor. Las pruebas se muestran en distintos colores, donde el tamaño de la barra representa el puntaje de cada prueba. y en el orden siguiente de izquierda a derecha: Arquitectura, Ingeniería y Construcción, Eficiencia Energética, Balance de Energía Eléctrica, Condiciones de Confort, Funcionamiento de la Casa, Comunicación y Conciencia Social, Diseño Urbano, Transporte y Asequibilidad, Innovación y Sustentabilidad. En color naranja se muestran las penalizaciones y en color púrpura las bonificaciones. [60]

Para el equipo CASA UNAM, se tuvieron los siguientes resultados por prueba:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1.- Arquitectura | 5° lugar, 102 / 120 puntos |
| 2.- Ingeniería y Construcción, | 1 ^{er} lugar, 80/80 puntos |
| 3.- Eficiencia Energética, | 15° lugar, 61.22/80 puntos |
| 4.- Balance de energía eléctrica, | 9° lugar, 76.5/120 puntos |
| 5.- Condiciones de Confort, | 16° lugar, 67.26/120 puntos |
| 6.- Funcionamiento de la Casa, | 18° lugar, 60.3/120 puntos |
| 7.- Comunicación y Conciencia Social, | 11° lugar, 60/80 puntos |
| 8.- Diseño urbano, Transporte y Asequibilidad, | 2° lugar, 112.94/120 puntos |
| 9.- Innovación, | 6° lugar, 63.95/80 puntos |
| 10.- Sustentabilidad, | 3 ^{er} lugar, 74/80 puntos |

Penalizaciones: 2

Bonificaciones: 4

Lo que da un total de 760.17 puntos de los 1000 disponibles, situando al equipo CASA UNAM en la decimotercera posición del puntaje final.

7.2 Resultados de la prueba Condiciones de Confort

Como se mencionó anteriormente, a través de la página de internet del Decatlón Solar Europa, se pudo tener acceso a información numérica y gráfica del puntaje de cada prueba, en donde se tenía la posibilidad de comparar valores entre diferentes equipos y poder desglosar cada prueba para ver con más detalle las puntuaciones que habían tenido lugar hasta ese momento. En la figura 123-a se muestran los resultados globales para la prueba de Condiciones de Confort y en la figura 123-b se muestran los resultados por sub prueba de la misma.

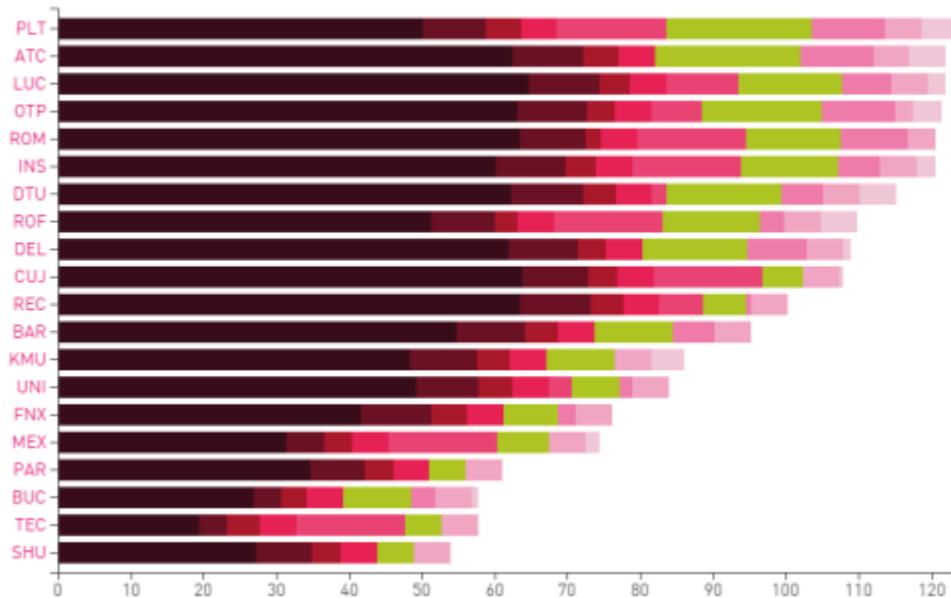


Fig. 123-a. Gráfica de la puntuación de las condiciones de confort. De izquierda a derecha: Temperatura, Humedad Relativa, Concentración de CO₂, Concentración de VOC's, Iluminación Natural, Condiciones de Confort, Aislamiento Acústico, Tiempo de Reverberación y Nivel de Ruido del HVAC. [60]

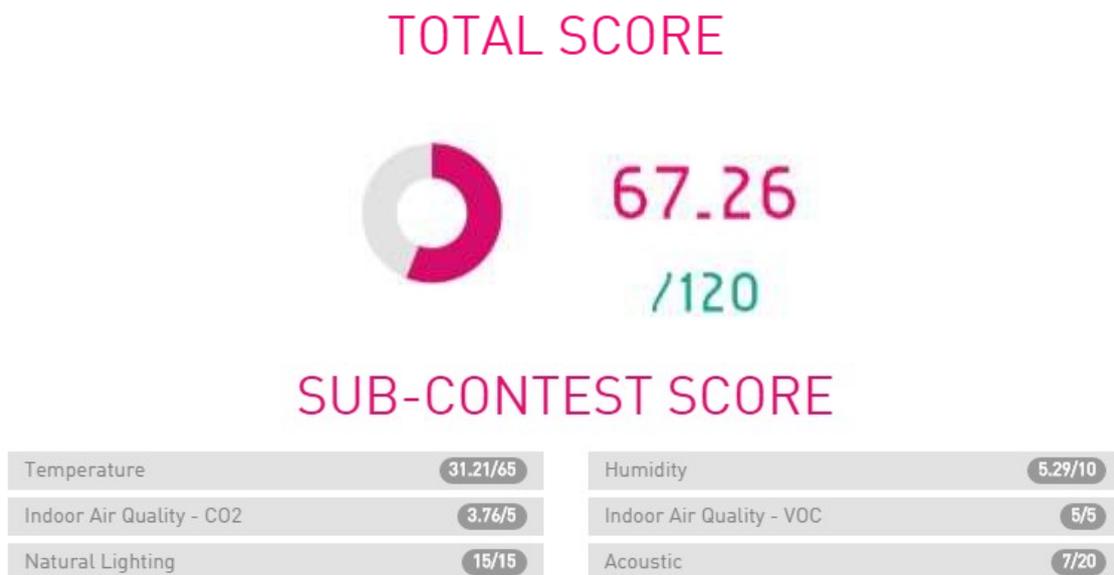


Fig. 123-b. Puntuación desglosada de la categoría Condiciones de Confort para el equipo CASA UNAM.[60]

7.3 Resultados de la prueba Funcionamiento de la Casa

De igual forma, gracias al portal del Decatlón Solar Europa, se pudo tener noción tanto del puntaje parcial y total, así como de los niveles objetivo de la prueba de temperatura y un monitoreo casi en tiempo real de las variables medidas a través de gráficas. En la figura 124-a se muestran los resultados globales para la prueba de Funcionamiento de la Casa y en la figura 124-b se muestran los resultados por sub pruebas de la misma.

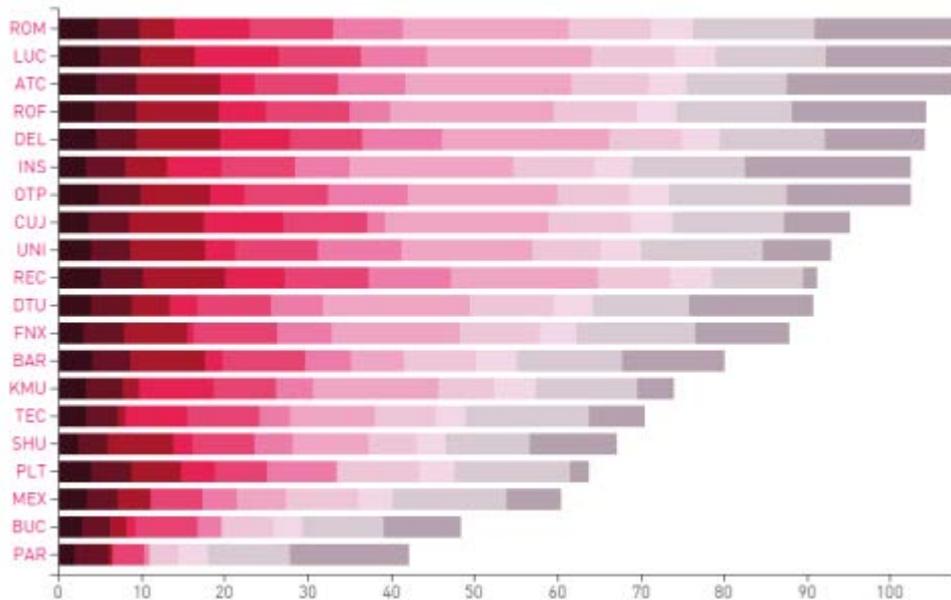


Fig. 124-a. Gráfica de la puntuación del Funcionamiento de la Casa. De izquierda a derecha: Refrigeración, Congelación, Lavado de Ropa, Secado de Ropa, Lavavajillas, Horno, Tomas de Agua Caliente, Cocinado, Entretenimiento, Cena y Consumo de Agua. [60]

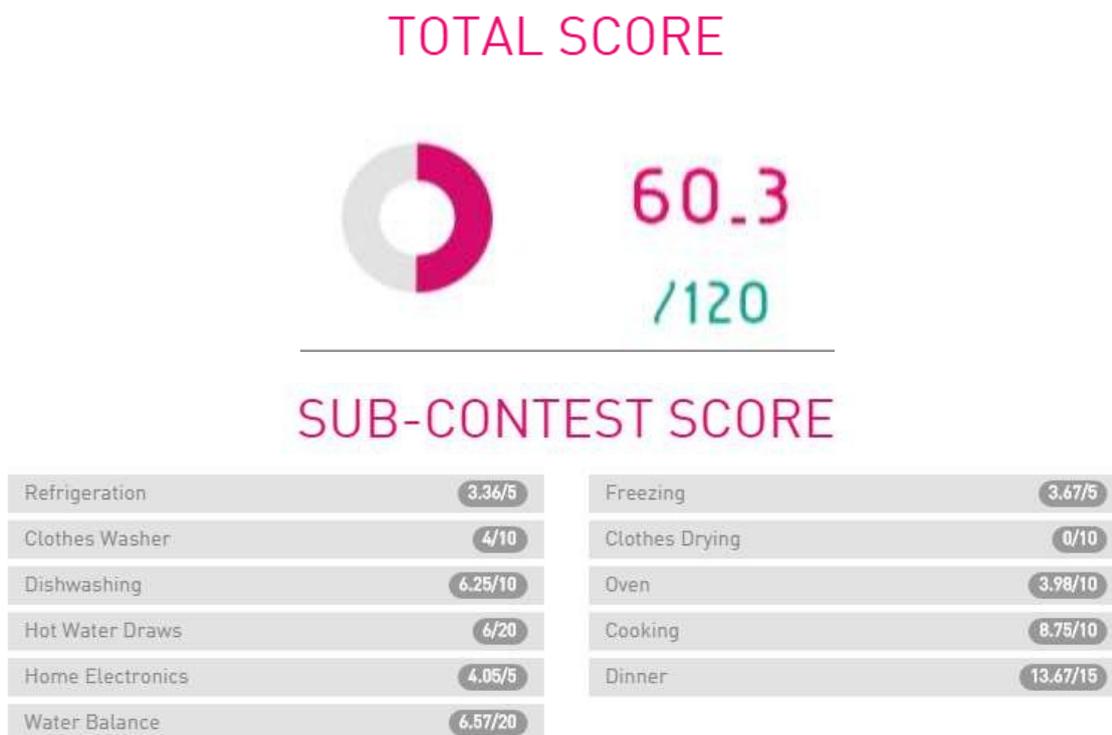


Fig. 124-b. Puntuación desglosada de la categoría de Funcionamiento de la Casa para el equipo CASA UNAM. [60]

8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, gracias a la página del Decatlón Solar Europa se pudo consultar información en forma gráfica del monitoreo de las variables medidas y al finalizar el evento se pudo analizar el desempeño que tuvo el prototipo al comparar el comportamiento que tuvo cada variable con los valores esperados. Sin embargo, cabe remarcar que durante el período de competencia las condiciones meteorológicas no fueron las mejores para el funcionamiento del prototipo ya que hubo lluvia y viento fuertes, afectando el comportamiento esperado del prototipo y por lo tanto, de las variables medidas.

Otro factor que influyó en el desempeño global fue el hecho de que los módulos de monitoreo y control presentaron daños debido al viaje y fueron notorios hasta la etapa de pruebas en el sitio de competencia, los cuales se intentaron reparar pero sin éxito. Adicionalmente el calentador eléctrico de respaldo sufrió un golpe que lo dañó de forma irreparable y que de igual forma fue notorio hasta el momento de hacer pruebas de conexión. Con lo anterior no se pudo contar con un sistema de monitoreo ni de calentamiento alternativo de agua.

8.1 *Temperatura*

Dado que el sistema se concibió para hacer frente a climas no tan extremos y de manera pasiva, salvo por el sistema de ventilación, el hecho de haber enfrentado condiciones meteorológicas inesperadas impactó considerablemente los valores de temperatura de los habitáculos, especialmente porque no se contó con un sistema activo para elevar dicha temperatura. En la figura 125 se muestra el comportamiento térmico de la cocina en contraste con la temperatura del exterior y la temperatura objetivo.

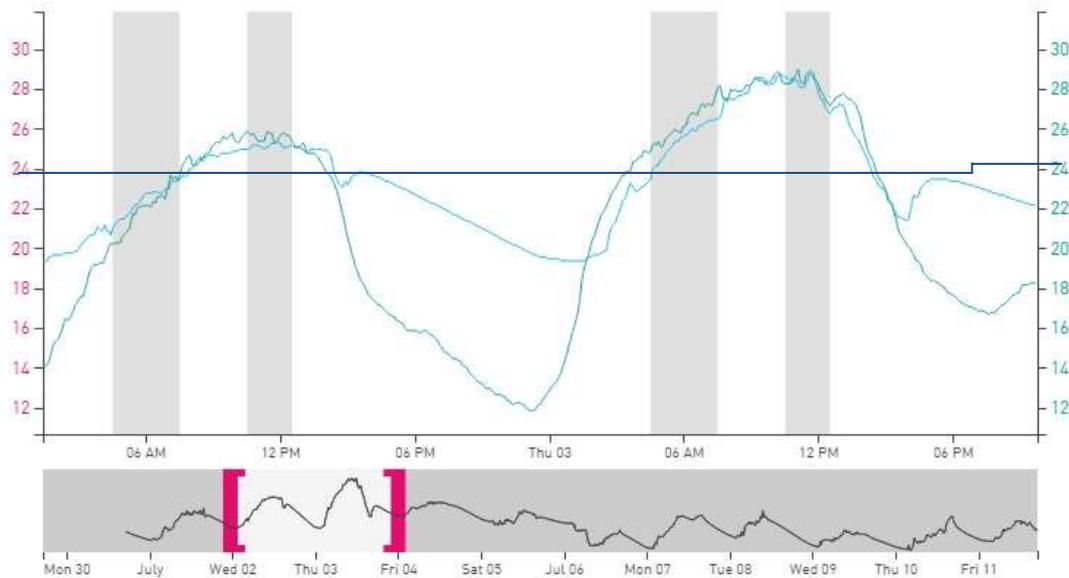


Fig. 125. Gráfica de la temperatura de la cocina (azul claro), temperatura del exterior (verde agua) y temperatura objetivo (azul marino) para un período de dos días (corchetes rosas) de los once de competencia (área gris). [60]

8.2 Humedad Relativa

De igual forma que con la temperatura, la humedad relativa tuvo un comportamiento fuera de lo esperado al tener días de lluvia, afectando los valores de la humedad relativa del interior de los habitáculos. En la figura 126 se muestra el comportamiento de la humedad relativa de la cocina en contraste con la humedad relativa del exterior y los intervalos de puntaje.

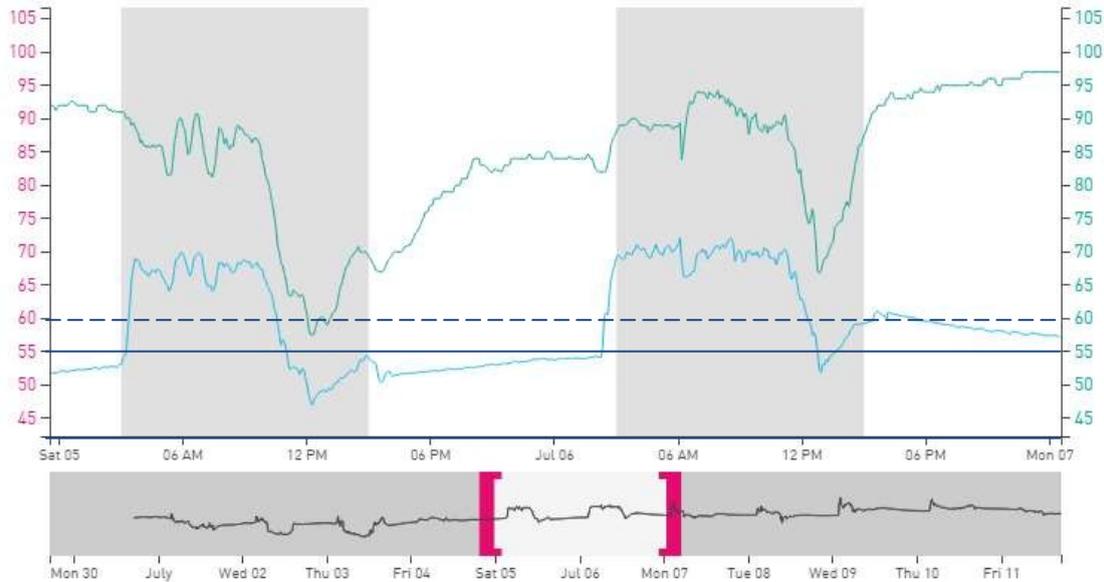


Fig. 126. Gráfica de la humedad relativa de la cocina (azul claro), humedad relativa del exterior (verde agua), los intervalos de puntaje máximo (azul marino continuo) y los intervalos de puntaje mínimo (azul marino punteado) para un período de dos días (corchetes rosas) de los once de competencia (área gris).[60]

8.3 Concentración de Dióxido de Carbono

Debido a que no se contó con un sistema de monitoreo funcional, no se pudieron conocer los niveles de dióxido de carbono para una acción de ventilación manual o automática, en cuyo caso al contar con condiciones desfavorables al exterior, habría afectado negativamente a la temperatura. En la figura 127-a se muestra el comportamiento del dióxido de carbono de la cocina en contraste con el nivel de puntaje máximo para la primera mitad del período de competencia y en la figura 127-b se muestra el comportamiento para la segunda mitad del mismo.

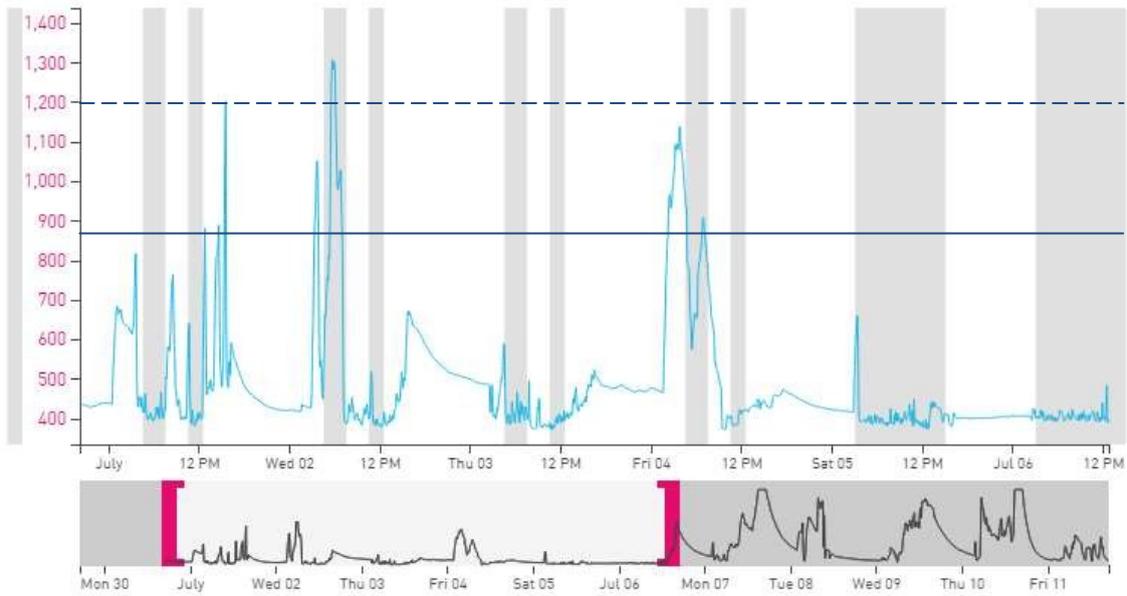


Fig. 127-a. Gráfica de la concentración de CO₂ en la cocina en contraste con el límite de puntaje máximo (azul marino continuo) y de puntaje mínimo (azul marino punteado) para la primer mitad de la competencia. [60]

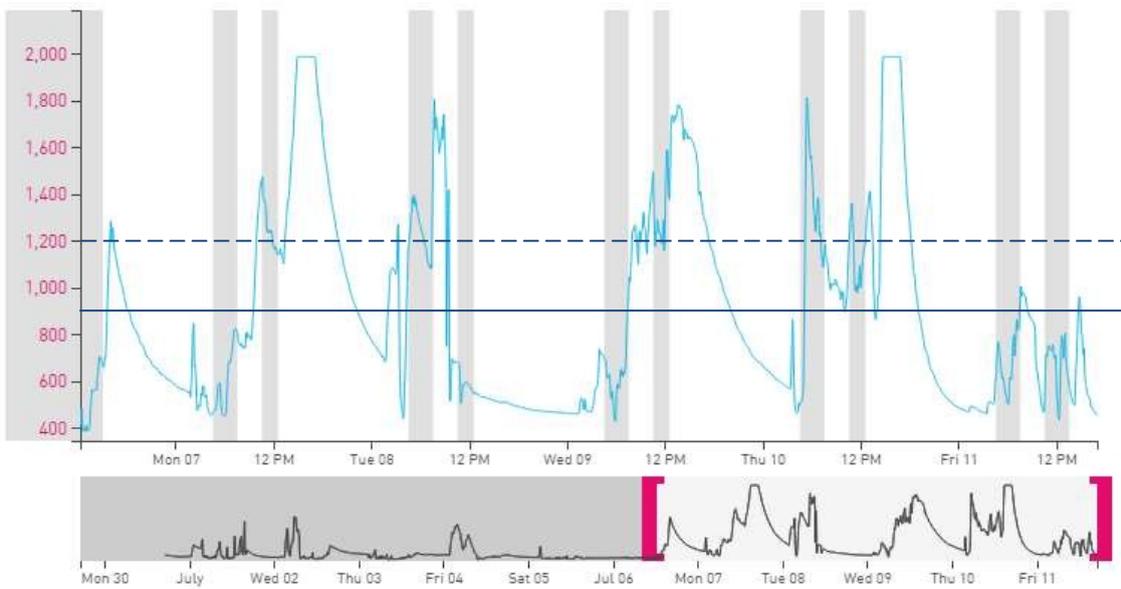


Fig. 127-b. Gráfica de la concentración de CO₂ en la cocina en contraste con el límite de puntaje máximo (azul marino continuo) y de puntaje mínimo (azul marino punteado) para la segunda mitad de la competencia. [60]

9 INSTALACIÓN EN UNIVERSUM

La etapa final del proyecto consistió en traer de regreso el prototipo a su lugar de origen, en este caso la Ciudad de México, con el fin de construirse de nuevo y ponerlo a prueba ante las condiciones para las cuales fue diseñado originalmente.

El lugar destinado para el montaje final del prototipo fue el museo universitario de ciencias UNIVERSUM, en donde estará durante un período mínimo de un año con fines de pruebas, monitoreo y exhibición con miras a extender dicho período de exhibición. En la figura 128 se muestra la fachada de dicho museo.



Fig. 128. Sede de exposición y pruebas del prototipo CASA UNAM en su etapa final. [61]

Para esta última etapa de construcción se requirió tanto de material adicional ya que mucho se desechó en Versalles, como de mano de obra extra y calificada, con el fin de tener un trabajo más profesional y garantizar su óptima instalación en el museo universitario de las ciencias. En la figura 129-a se muestra una etapa de la construcción del prototipo y en la figura 129-b se muestra el prototipo terminado.



Fig. 129-a. Construcción del prototipo CASA UNAM en el jardín posterior del museo universitario de las ciencias UNIVERSUM.



Fig. 129-b. Prototipo CASA UNAM terminado en el jardín posterior del museo universitario de las ciencias UNIVERSUM.

9.1 Trabajo Actual

Para esta etapa se concibieron nuevos requerimientos en la mayoría de las áreas involucradas en dicho proyecto, a continuación se presenta una lista de cambios y mejoras en cuanto a la parte de control y monitoreo apegándose a las mediciones que se realizaron durante la competencia además de mejoras generales.

- Sistema de monitoreo de temperatura de los electrodomésticos mediante el uso de termopares tipo k.
- Sistema de medición de consumo y producción de energía eléctrica mediante medidores proporcionados por Schneider Electric y una interfaz de comunicación RS485.
- Sistema de medición de consumo de agua independiente por toma mediante sensores de flujo de agua del tipo de aletas y sensor de efecto Hall.

- Sistema de medición y despliegue de datos para el bombeo mecánico de agua en la torre hidráulica mediante bicicletas.
- Sistema de medición de variables de confort en el exterior de los habitáculos (módulo de monitoreo exterior).
- Control del sistema de despliegue de captadores pluviales mediante Clipsal.
- Interfaz de visualización de datos en internet y en cualquier dispositivo móvil.

10 CONCLUSIONES

10.1 Prototipo CASA UNAM

En términos generales ha sido un proyecto muy interesante y productivo, ya que al ser inter y multidisciplinario se le permite a una gran cantidad de alumnos y académicos interactuar y desarrollar un proyecto sustentable de escala real con la gratificación no solamente de obtener un título mediante su trabajo de tesis o liberar su servicio social, sino de contribuir al desarrollo sustentable en el país y despertar el interés y curiosidad de la gente por este tipo de desarrollos.

El hecho de haber regresado a México con tres premios fue gratificante debido al gran esfuerzo de todo el equipo, aunque tal vez no tanto como el aprendizaje teórico y práctico adquirido a lo largo del proceso de diseño y ejecución del proyecto.

10.2 Sistema de Control y Monitoreo

Los resultados obtenidos para las pruebas de Condiciones de Confort y Funcionamiento de la Casa no son reflejo del desempeño del sistema de control y monitoreo, ya que las condiciones meteorológicas no fueron las esperadas y por lo tanto el prototipo no pudo tener el funcionamiento pasivo para el cual fue diseñado. Sin embargo, de haber tenido las condiciones favorables se pudo haber controlado la temperatura, la humedad y la calidad del aire mediante el control manual del sistema de control de iluminación en intervalos regulares de tiempo.

Los dos puntos importantes que afectaron el desempeño de estas dos pruebas fueron principalmente el daño presentado en el calentador eléctrico de respaldo, pudiendo haber sido evitado mediante una adecuada sujeción durante su traslado, y en segundo lugar el daño en los módulos de monitoreo, pudiendo haber sido evitado mediante un embalaje adecuado y sobre todo, una manufactura de mayor calidad.

10.3 Aportaciones Personales

En términos generales las aportaciones personales al proyecto fueron durante su ejecución al contribuir en la construcción del prototipo tanto en el museo universitario de ciencias y artes, como en el sitio de competencia en Versalles, Francia.

Particularmente contribuí a construir un sistema de control y monitoreo que, aunque no funcionó en su totalidad, sentó las bases para una segunda iteración con participación de estudiantes que presten su servicio social o futuros decatletas y finalmente, la generación de este trabajo que queda como referencia a dichos alumnos para desarrollar mejoras para una futura edición del decatlón solar o como apoyo para desarrollos relacionados con el uso de los sensores o partes del sistema desarrollado, que en el caso de los sensores de gas no existe mucha documentación con respecto a su funcionamiento y uso.

10.4 Conocimientos adquiridos

A lo largo del desarrollo de este proyecto adquirí una gran cantidad de conocimientos, tanto académicos y profesionales como de relaciones interpersonales. Dentro de los primeros, aprendí conceptos teóricos y prácticos de instalaciones eléctricas, de control, fotovoltaicas y sistemas comerciales de domótica y control de iluminación, de la propuesta arquitectónica del proyecto; de su estructura, materiales e interfaces, de criterios de medición e instrumentación en general y particularmente de los contaminantes atmosféricos, reforcé mis conocimientos de los requerimientos teóricos y prácticos para hacer funcionar componentes electrónicos, como detectores de gas, termopares, sensores de temperatura digitales, medidores de flujo, relojes en tiempo real e interfaces de comunicación, mejoré mis conocimientos en el proceso de programación, diseño, pruebas y manufactura. Por otro lado reforcé mis habilidades interpersonales como el trabajo en equipo, organización, comunicación y solución de problemas de una manera interdisciplinaria.

10.5 Trabajo a Futuro

Durante el tiempo que el prototipo se encuentre en exhibición en el museo universitario de las ciencias, podrán tener lugar diversas investigaciones tanto en comportamiento térmico de la casa, como en la generación de valores en términos del consumo y bombeo de agua, de los cuales no se cuenta con estadísticas a nivel nacional. Adicionalmente, tanto el sistema de control y monitoreo, como el de control de iluminación cuentan con la flexibilidad de poder agregar elementos como sensores o actuadores con el fin de poder ampliar la información generada, con lo que pueden ser probados diferentes materiales o componentes y obtener información relacionada a su comportamiento en un escenario real.

REFERENCIAS

- [1] Recuperado el 3 de octubre de 2015 de <http://www.solardecathlon.gov/about.html>
- [2] Recuperado el 3 de octubre de 2015 de <http://www.sdeurope.org/about/?lang=en>
- [3] Recuperado el 3 de octubre de 2015 de <http://www.solardecathlon2014.fr/en/competition>
- [4] Recuperado el 10 de octubre de 2015 de http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=14562
- [5] Recuperado el 10 de octubre de 2015 de http://www.cres.gr/greenbuilding/PDF/prend/set4/WI_31_Pre-FV_version_prEN_15251_Indoor_Environment.pdf
- [6] Recuperado el 12 de octubre de 2015 de Formaldehyde exposure limits: World Wide Table, How to convert ppm to mg/m³ http://inspectapedia.com/indoor_air_quality/Formaldehyde_Gas_Exposure_Limits.php#World
- [7] Recuperado el 12 de octubre de 2015 de http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=2246
- [8] Recuperado el 12 de octubre de 2015 de http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=4940
- [9] Recuperado el 12 de octubre de 2015 de <http://www.ehu.es/acustica/espanol/salas/tires/tires.html>
- [10] Recuperado el 14 de octubre de 2015 de http://www.iso.org/iso/catalogue_detail.htm?csnumber=36201
- [11] Recuperado el 14 de octubre de 2015 de http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=32341
- [12] Recuperado el 14 de octubre de 2015 de http://www.solardecathlon2014.fr/ftp/docs/MEX_PM7.pdf
- [13] Recuperado el 17 de octubre de 2015 de <http://arquitectura.unam.mx/casa.html#c-tabs2a>
- [14] Recuperado el 20 de octubre de 2015 de <http://www.bticino.es/productos/DomoticaMyHome/MyHome.php>
- [15] Recuperado el 20 de octubre de 2015 de <http://www.lutron.com/TechnicalDocumentLibrary/367-2054.pdf>
- [16] Recuperado el 20 de octubre de 2015 de http://www.schneider-electric.com.mx/sites/mexico/es/productos-servicios/sistemas-instalacion-control/oferta-de-productos/presentacion-de-funcion.page?p_function_id=16

- [17] Recuperado el 26 de octubre de 2015 de <http://www.ruoa.unam.mx/>
- [18] Recuperado el 26 de octubre de 2015 de http://www.picarro.com/products_solutions/trace_gas_analyzers/co_co2_ch4_h2o
- [19] Recuperado el 3 de noviembre de 2015 de <http://www.atmosfera.unam.mx/espectroscopia/doas/>
- [20] VILCHIS M., S.R.S. 2014. Diseño de Instalaciones de ACS Solar y Climatización de CASA-UNAM. Tesis M. en I. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México. 144 pp.
- [21] Recuperado el 7 de noviembre de 2015 de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m020ssa13.html>
- [22] Recuperado el 15 de noviembre de 2015 de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/021ssa13.html>
- [23] Recuperado el 15 de noviembre de 2015 de <http://www.artemecatronica.com/wp-content/uploads/2014/11/LM35.jpg>
- [24] Recuperado el 15 de noviembre de 2015 de <http://www.proyectoelectronico.com/medidores/imagenes/sensor-humedad-hih4030.jpg>
- [25] Recuperado el 15 de noviembre de 2015 de http://www.seeedstudio.com/wiki/images/2/2e/HCHO_Sensor_01.jpg
- [26] Recuperado el 20 de noviembre de 2015 de http://blog.hunabsys.com/wp-content/uploads/2016/01/sensor-de-co2-dioxido-de-carbono-mg811-arduino-avr-pic-524201-MLM20295577058_052015-O.jpg
- [27] Recuperado el 20 de noviembre de 2015 de <http://www.navego.labelectronica.com/Anuncios/Monoxido/2.png>
- [28] Recuperado el 20 de noviembre de 2015 de <http://www.navego.labelectronica.com/Anuncios/Ozono/2.png>
- [29] Recuperado el 5 de diciembre de 2015 de http://www.microchip.com/_images/ics/medium-PIC16F884-PDIP-40.png
- [30] Recuperado el 5 de diciembre de 2015 de <https://en.wikipedia.org/wiki/Clipsal>
- [31] Recuperado el 5 de diciembre de 2015 de <http://www2.clipsal.com/cis/data/page/428/5753-Series2.jpg>
- [32] Recuperado el 5 de diciembre de 2015 de http://www.noushouse.com.au/store/images/nh_5031PE.jpg
- [33] Recuperado el 5 de diciembre de 2015 de <https://www.clipsal.com/getmedia/2af6d716-ff48-481f-b984->

162409f0e3a0/HO_PO_EESunset_MS_01.png.aspx?width=1200&height=1000&ext=.png

[34] Recuperado el 8 de diciembre de 2015 de <http://updates.clipsal.com/assets/images/products/J00000501.PNG>

[35] Recuperado el 8 de diciembre de 2015 de http://www.noushouse.com.au/store/images/dlt_white.jpg

[36] Recuperado el 8 de diciembre de 2015 de <http://www2.clipsal.com/cis/data/page/428/L5508D1A4.jpg>

[37] Recuperado el 8 de diciembre de 2015 de <http://updates.clipsal.com/assets/images/products/J00006671.PNG>

[38] Recuperado el 8 de diciembre de 2015 de <http://www2.clipsal.com/cis/data/page/428/5104BCL2.jpg>

[39] Recuperado el 12 de diciembre de 2015 de http://www.automatedhome.co.uk/images/news/wiser_big.jpg

[40] Recuperado el 12 de diciembre de 2015 de <http://updates.clipsal.com/assets/images/products/J0001632.PNG>

[41] Recuperado el 12 de diciembre de 2015 de <http://clipsal.com.pk/image/cache/data/5555-500x515.jpg>

[42] Mardiana-Idayu, A., Riffat, S. B. (2012), Review on heat recovery technologies for building applications, *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2012), pp. 1241-1255, DOI: 10.1016/j.rser.2011.09.026.

[43] Recuperado el 15 de diciembre de 2015 de http://www.homepower.com/sites/default/files/styles/article_gallery_active/public/articles/images/HRV_Airflow.jpg?itok=wfWDj2jV

[44] Recuperado el 15 de diciembre de 2015 de <http://rheem.com.mx/linea-6/deposito-electrico.rheem>

[45] Recuperado el 15 de diciembre de 2015 de <http://i.imgur.com/5Oo88oN.png>

[46] Recuperado el 15 de diciembre de 2015 de <http://www.tinyosshop.com/image/cache/data/XBEE/XBee%20Pro%2063mW%20Wire%20Antenna%20-600x600.JPG>

[47] Recuperado el 15 de diciembre de 2015 de <http://www.electan.com/images/IGP1391.jpg>

[48] Recuperado el 19 de diciembre de 2015 de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>

[49] Recuperado el 19 de diciembre de 2015 de <https://www.maximintegrated.com/en/products/1-wire/flash/overview/index.cfm>

[50] Recuperado el 19 de diciembre de 2015 de https://cdn2.bigcommerce.com/server500/810ec/products/2741/images/15933/10456-01_23680_04157.1368472067.1280.1280.jpg?c=2

[51] Recuperado el 21 de diciembre de 2015 de <https://cdn.sparkfun.com/assets/parts/7/1/1/5/11373-01.jpg>

[52] Recuperado el 21 de diciembre de 2015 de www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf

[53] Recuperado el 21 de diciembre de 2015 de <http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-hih4030-4031-series-product-sheet-009021-4-en.pdf?name=HIH-4030-001>

[54] Recuperado el 21 de diciembre de 2015 de <http://www.winsen-sensor.com/d/files/solid-electrolyte/mg811.pdf>

[55] Recuperado el 23 de diciembre de 2015 de <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-7%20Ver1.3%20-%20Manual.pdf>

[56] Recuperado el 23 de diciembre de 2015 de <http://www.winsen-sensor.com/d/files/semiconductor/mq131-low.pdf>

[57] Recuperado el 23 de diciembre de 2015 de <http://www.winsen-sensor.com/d/files/flat-surfaced/wsp2110.pdf>

[58] Recuperado el 27 de diciembre de 2015 de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/233/cap4.html>

[59] Recuperado el 27 de diciembre de 2015 de <http://www.rhydolabz.com/wiki/wp-content/uploads/DZ1.jpg>

[60] Recuperado el 8 de enero de 2016 de <http://www.solardecathlon2014.fr/en/monitoring>

[61] Recuperado el 8 de enero de 2016 de http://farm4.static.flickr.com/3088/3088414664_5e01425ae5.jpg

ANEXOS

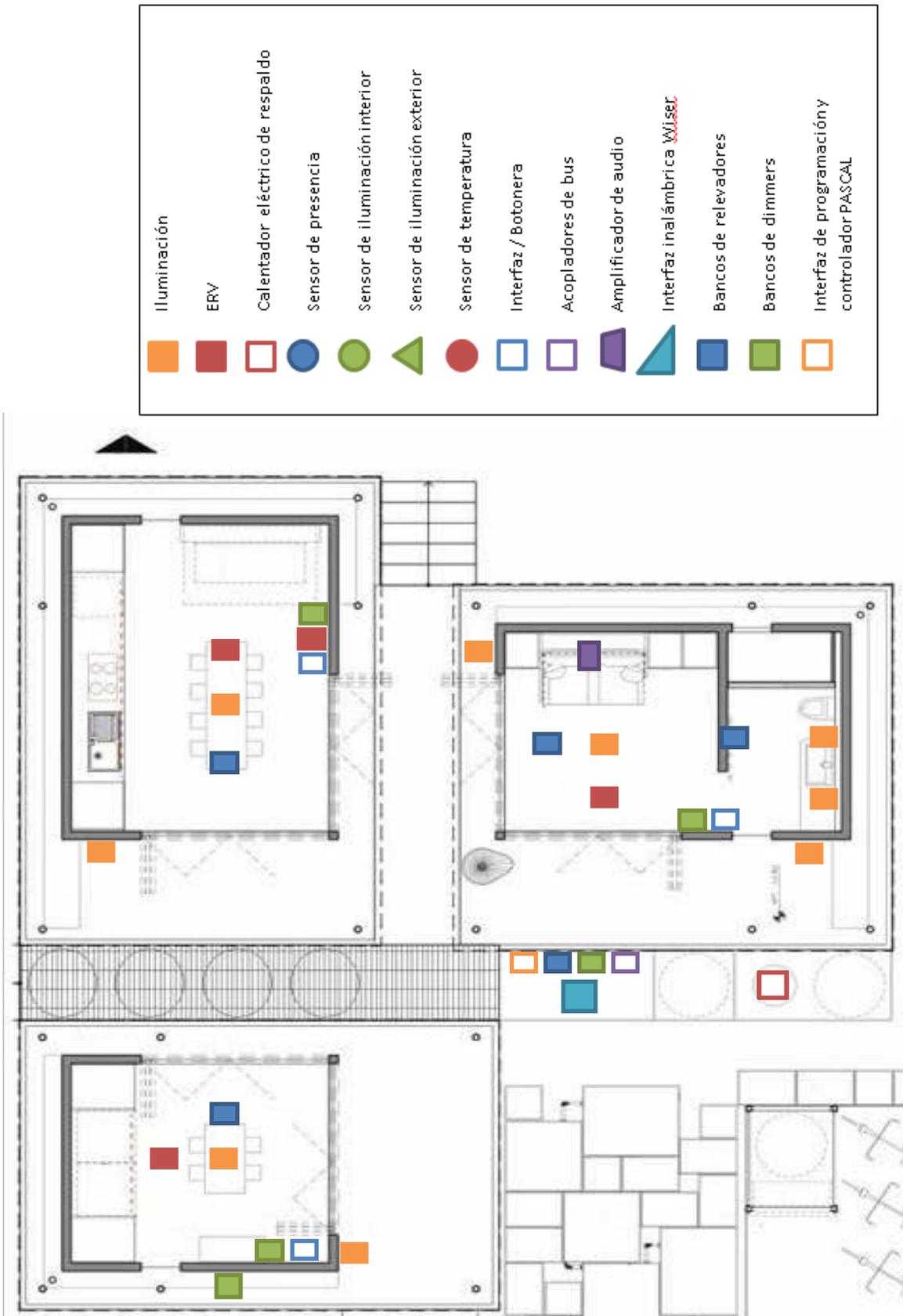
Anexo 1

Ubicación de los sensores para el monitoreo en la villa solar.



Anexo 2

Ubicación de los componentes de Clipsal y cargas



Anexo 3

Diagrama de los componentes del módulo de control

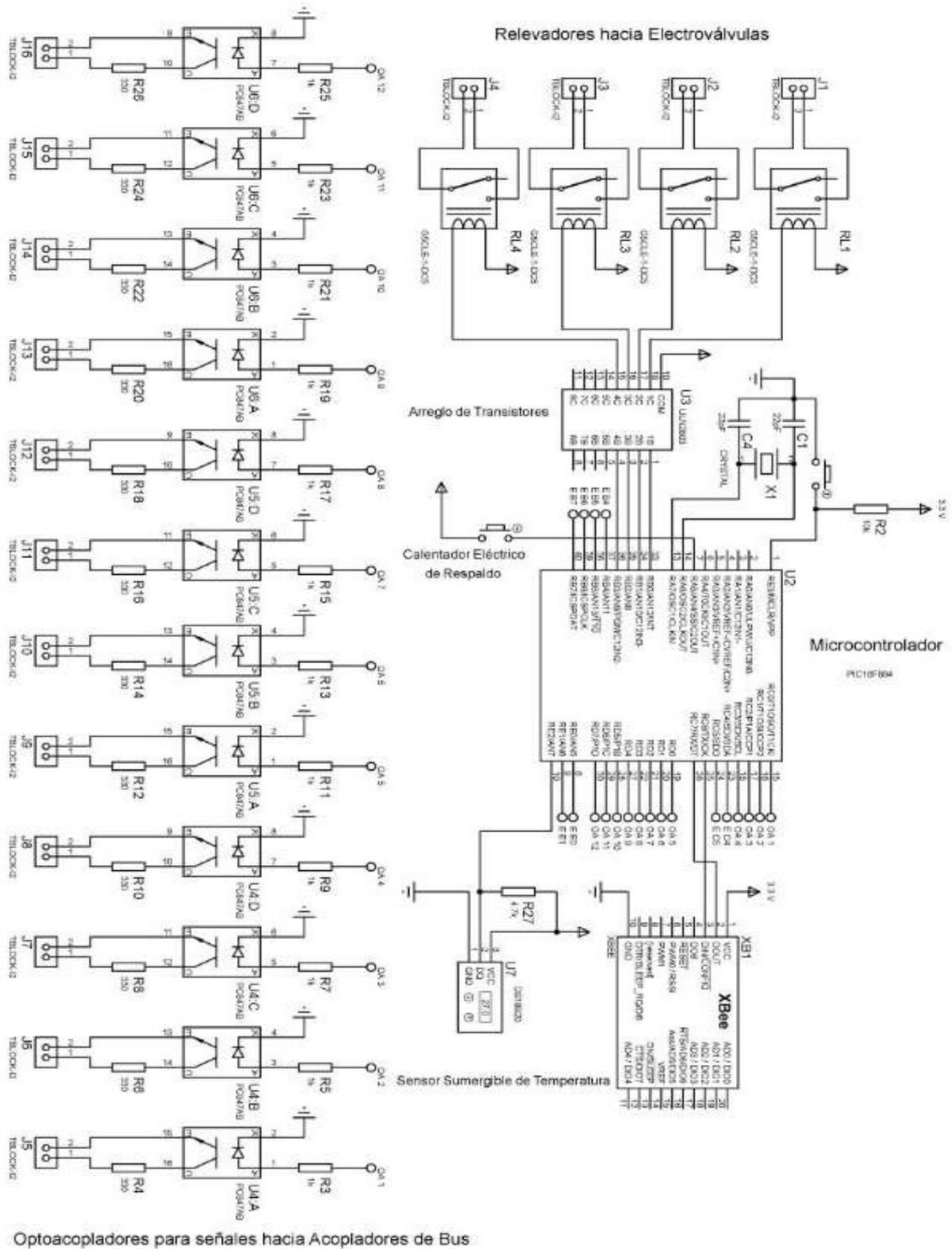
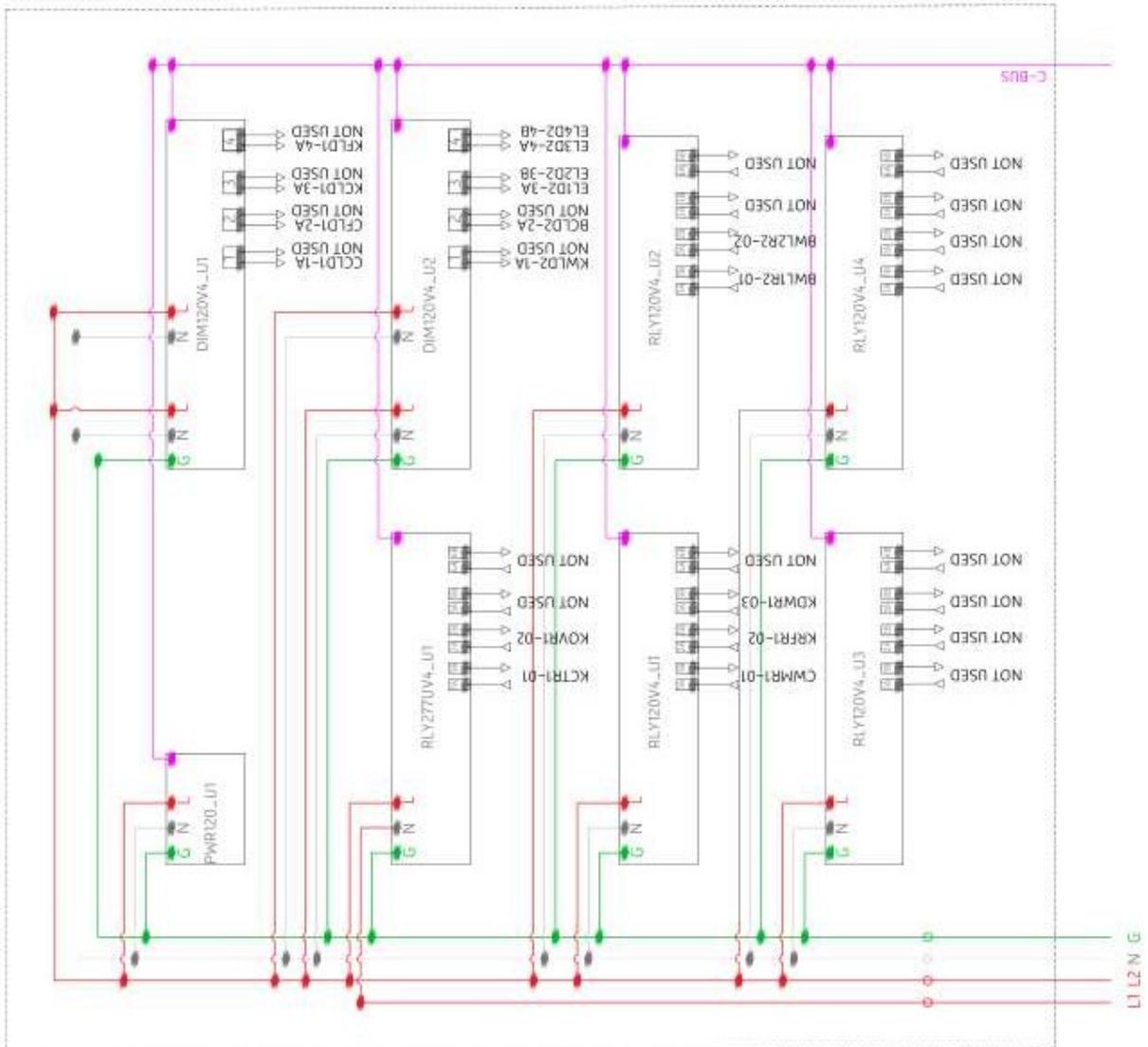


Diagrama de los componentes de comunicación, entradas, salidas y sensor de temperatura del módulo de control.

Anexo 4

Cargas controladas por Clipsal

CCLD1-1A	Community Ceiling Lamp	Dimmer 1	Terminal 1A
CFLD1-2A	Community Furniture Lamp	Dimmer 1	Terminal 2A
KCLD1-3A	Kitchen Ceiling Lamp	Dimmer 1	Terminal 3A
KFLD1-4A	Kitchen Furniture Lamp	Dimmer 1	Terminal 4A
KWL02-1A	Kitchen Wall Lamp	Dimmer 2	Terminal 1A
BCLD2-2A	Bedroom Ceiling Lamp	Dimmer 2	Terminal 2A
ELD02-3A	Exterior Lamp 1	Dimmer 2	Terminal 3A
ELD02-3B	Exterior Lamp 2	Dimmer 2	Terminal 3B
ELD02-4A	Exterior Lamp 3	Dimmer 2	Terminal 4A
ELD02-4B	Exterior Lamp 4	Dimmer 2	Terminal 4B
KC2R1-01	Kitchen Cooktop 277V	Relay 1	Terminal 1A/1B
KO2R1-02	Kitchen Oven 277V	Relay 1	Terminal 2A/2B
CW1R1-01	Community Washing Machine 120V	Relay 1	Terminal 1A/1B
KR1R1-02	Kitchen Refrigerator 120V	Relay 1	Terminal 2A/2B
KD1R1-03	Kitchen Dishwasher 120V	Relay 1	Terminal 3A/3B
BWL1R2-01	Bedroom Wall Lamp Left 120V	Relay 2	Terminal 1A/1B
BWL1R2-02	Bedroom Wall Lamp Right 120V	Relay 2	Terminal 2A/2B



Anexo 5

Diagrama de flujo del sistema de control y monitoreo.

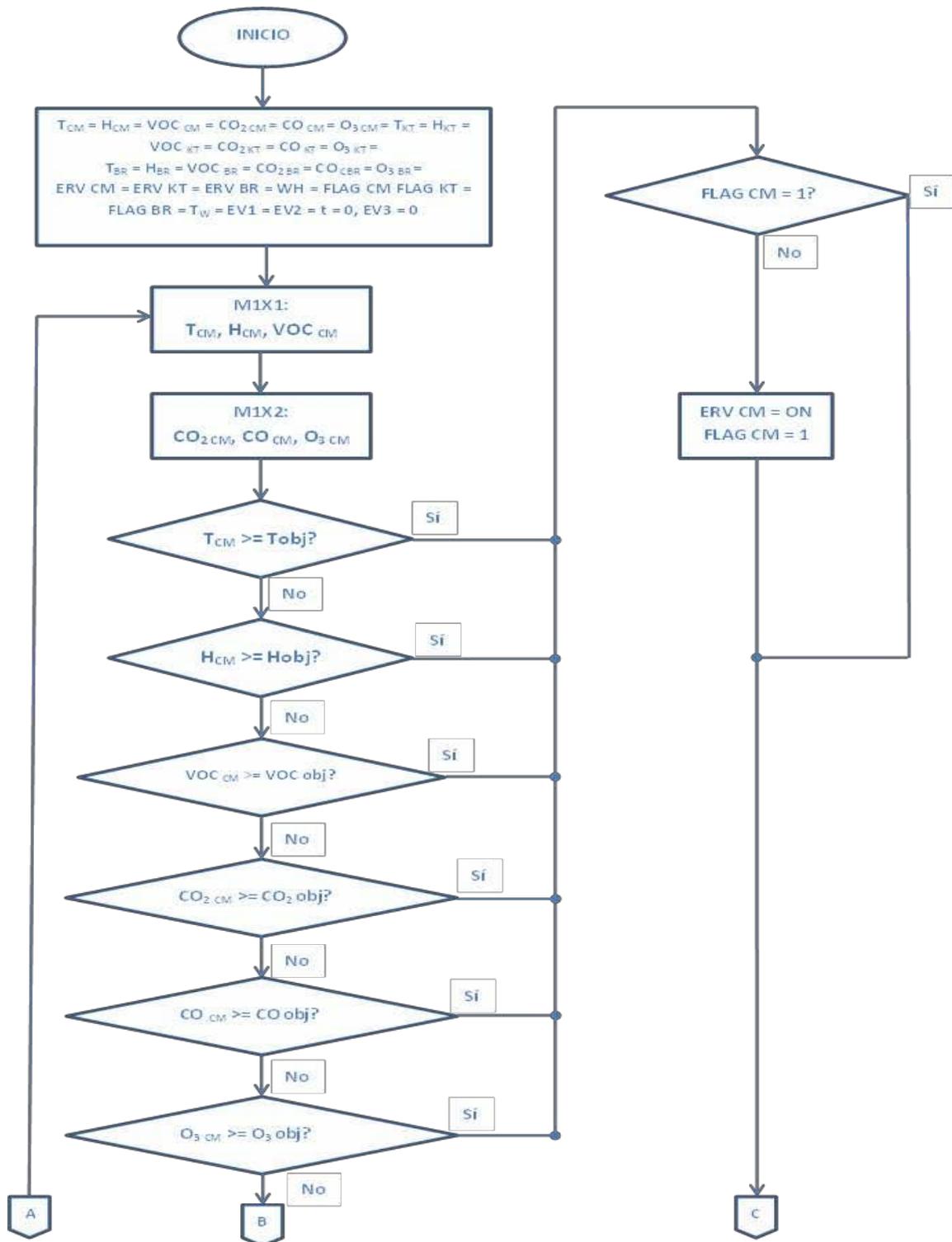


Diagrama de flujo de funcionamiento del módulo de control y comunicación con el módulo de monitoreo 1, donde CM se refiere a community (espacio comunitario), FLAG es una bandera de activación del ERV, M1X1..2 hace referencia al módulo 1 Xbee 1 y 2, y los términos -obj se refieren a parámetros objetivo o de referencia de las variables de confort.

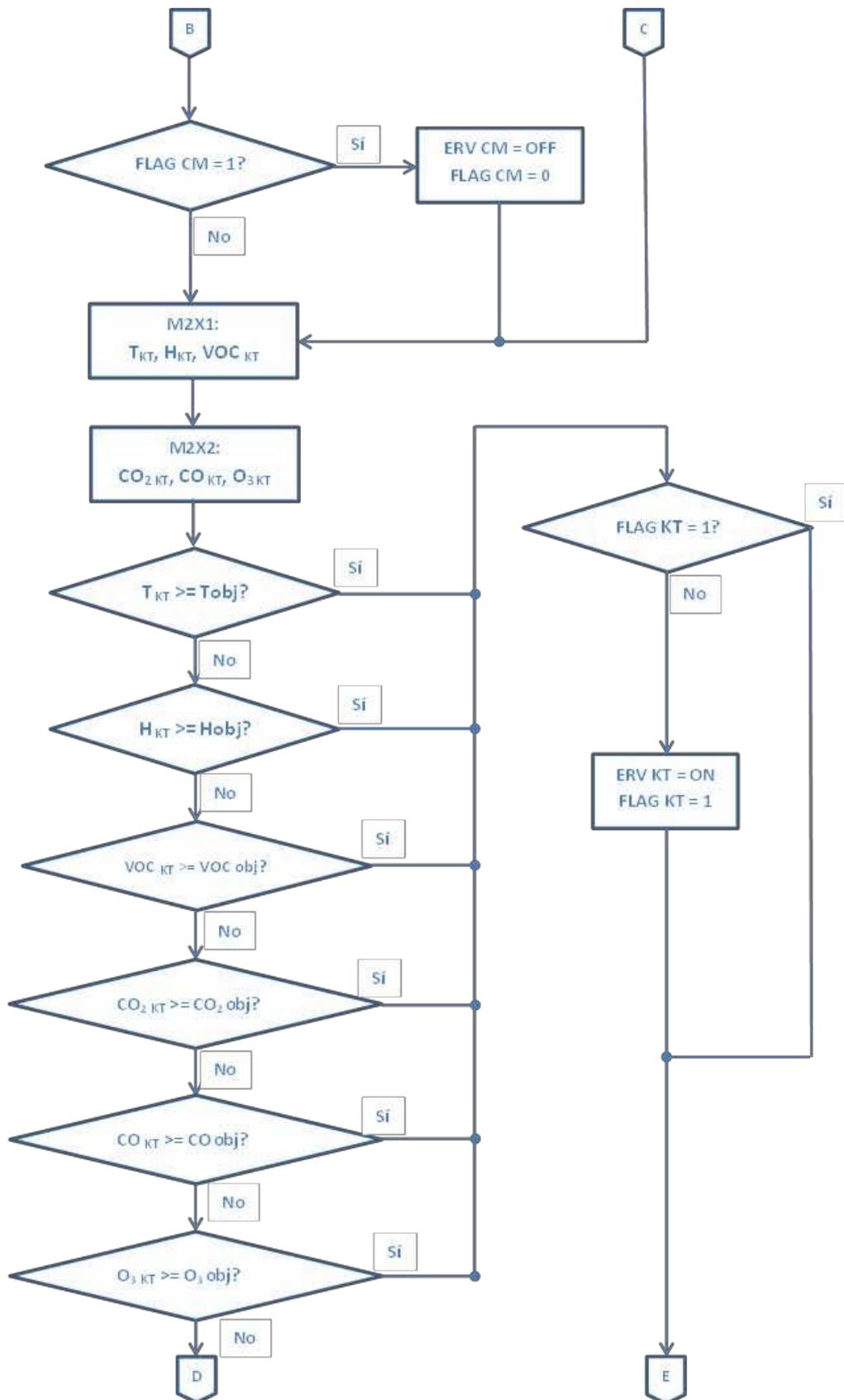


Diagrama de flujo de funcionamiento del módulo de control y comunicación con el módulo de monitoreo 2, donde KT se refiere a kitchen (cocina), FLAG es una bandera de activación del ERV, M2X1..2 hace referencia al módulo 2 Xbee 1 y 2, y los términos -obj se refieren a parámetros objetivo o de referencia de las variables de confort.

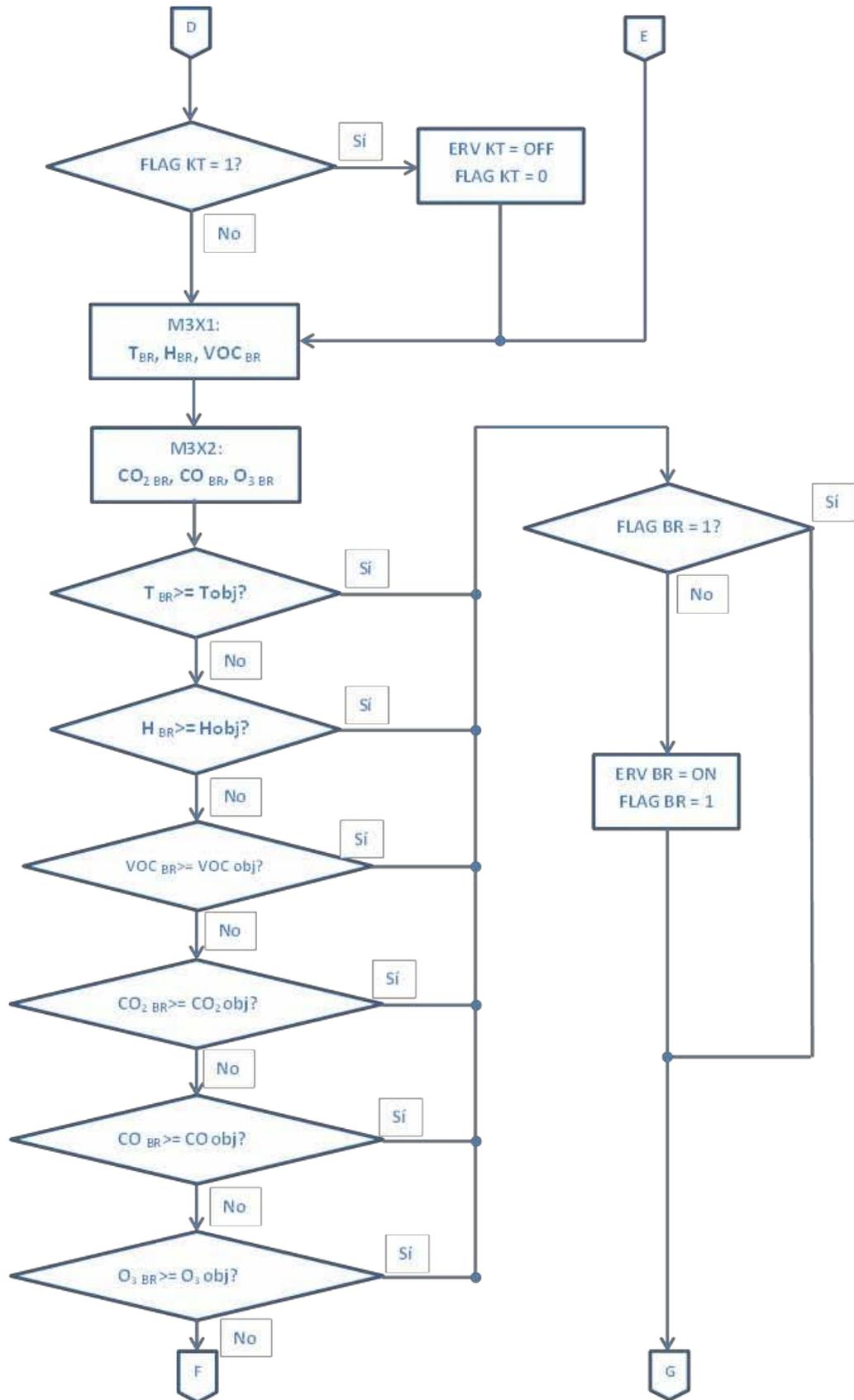


Diagrama de flujo de funcionamiento del módulo de control y comunicación con el módulo de monitoreo 3, donde BR se refiere a bedroom (dormitorio), FLAG es una bandera de activación del ERV, M3X1..2 hace referencia al módulo 3 Xbee 1 y 2, y los términos -obj se refieren a parámetros objetivo o de referencia de las variables de confort.

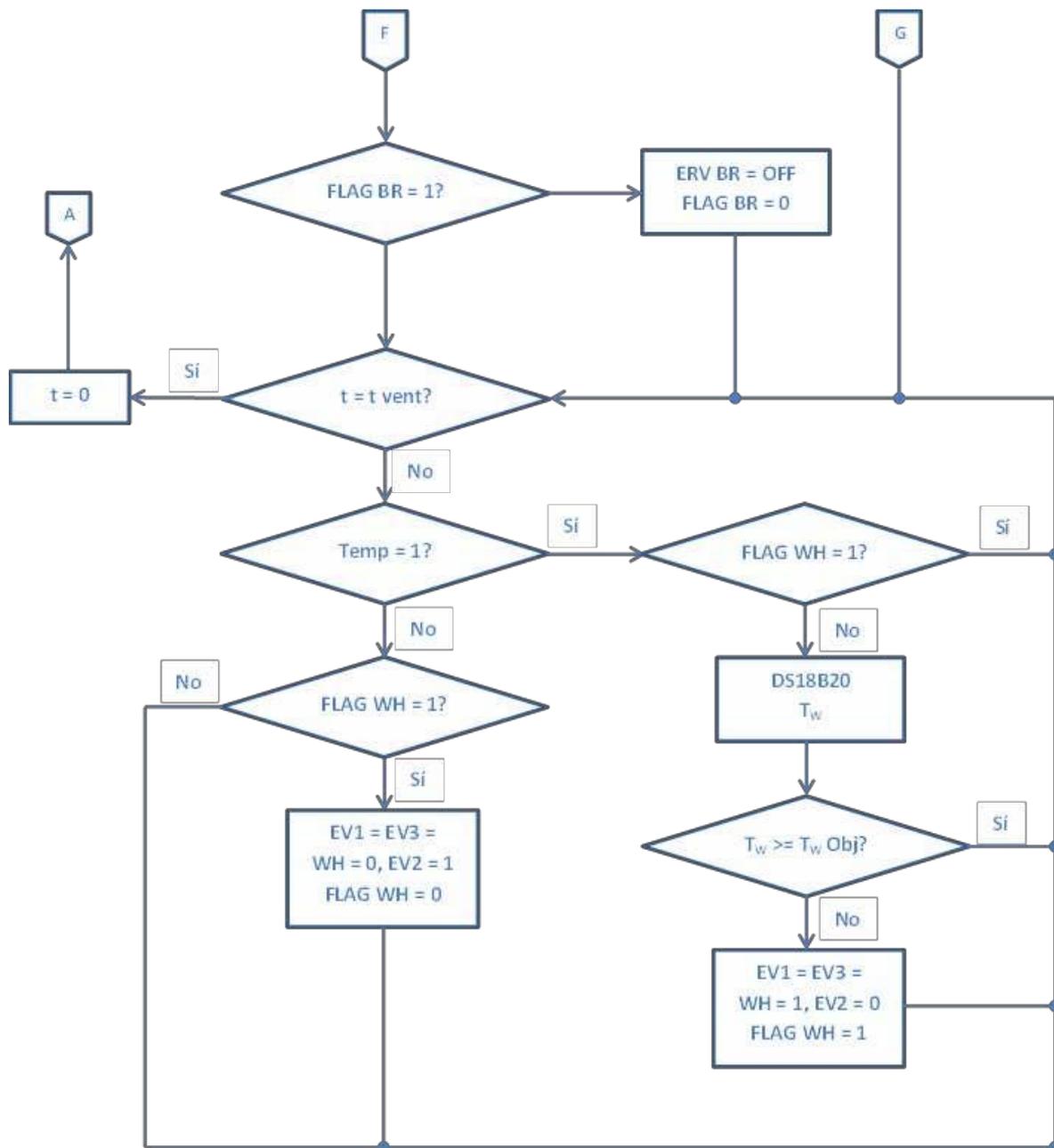


Diagrama de flujo de funcionamiento del módulo de control donde se muestra la interacción con los componentes del sub-sistema de control de flujos y encendido del calentador eléctrico de respaldo, donde t es el tiempo transcurrido, t_{vent} es el tiempo preestablecido de ventilación, FLAG WH es una bandera de activación del calentador eléctrico, WH se refiere a Water Heater (calentador de agua) y corresponde a una salida digital hacia los optoacopladores para el encendido del calentador eléctrico, T_w es la temperatura del agua medida a través del sensor de temperatura sumergible DS18B20, Temp es una variable digital de un bit de entrada al módulo de control mediante un interruptor o botón y EV1..3 se refiere a las electroválvulas.

Anexo 6

Diagrama de flujo del control de iluminación.

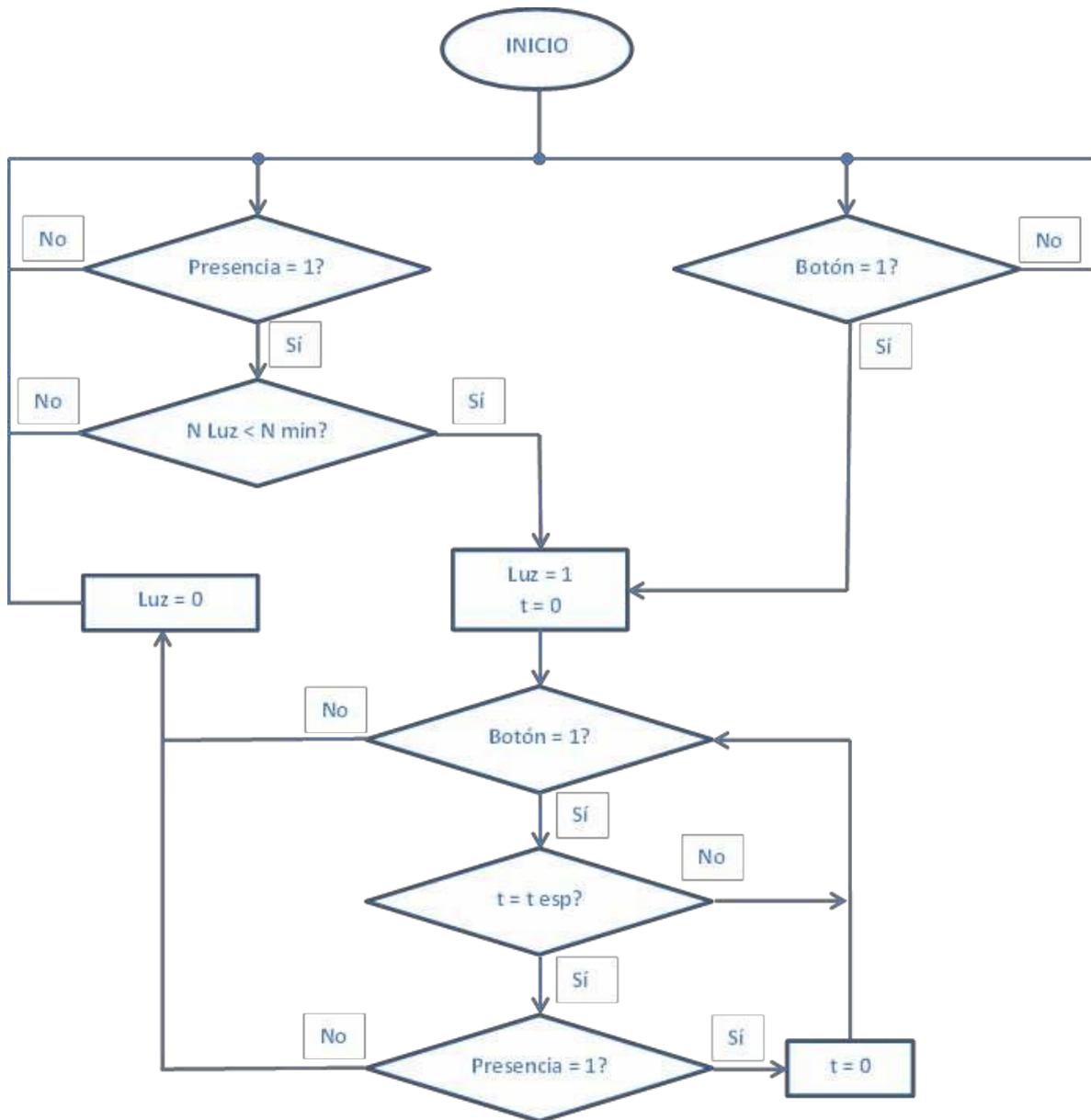


Diagrama de flujo para el control de la iluminación interior, donde N Luz se refiere al valor arrojado por el sensor de iluminación interior, N mín es un parámetro de comparación, Luz es la variable de controla el encendido y apagado de la iluminación, t es el tiempo transcurrido y t esp es un tiempo programable de espera.

Anexo 7

Código del microcontrolador del módulo de control

```
#include <16F917.h> //Librería del PIC 16F917
#include <math.h> //Librería de funciones matemáticas
#include <delay.h> //Velocidad del reloj (20MHz)
#include <FUSES.HS> //High Speed para el reloj externo
#include <USE_RS232.h> //Configuración del UART

#include <1wire.c> //Librería para el protocolo 1wire
#include <ds1820.c> //Librería para el sensor DS18B20

int16 Tc,Hc,VOCc,CO2c,COc,O3c;
int16 Tk,Hk,VOck,CO2k,COk,O3k; //Variables de enteros de 16 bits
int16 Tb,Hb,VOCb,CO2b,COb,O3b;
int16 temp,hum,met,diox,monox,ozo;

float Tcm,Hcm,VOCcm,CO2cm,COcm,O3cm;
float Tkt,Hkt,VOckt,CO2kt,COkt,O3kt; //Variables de punto flotante
float Tbr,Hbr,VOCbr,CO2br,CObr,O3br,Tw;
float Tobj,HRobjsup,HRobjinf,VOCobj,CO2obj,COobj,O3obj,Twobj;
float t,hr,voc,co2,co,o3,VRL;

short WH,FLAGcm,FLAGkt,FLAGbr,FLAGWH; //Variables de bit

float temperatura(temp) //Función para calcular la temperatura
{ //en °C del sensor LM35
  t=temp*0.48876;
  return t;
}

float humedad(hum) //Función para calcular la humedad relativa
{ // en % del sensor HIH4030
  hr=(hum*(5/1023)-0.8)/(0.031);
  return hr;
}

float metanal(met) //Función para calcular la concentración
{ //en ug/m^3 de VOC's, particularmente
  VRL=met*(5/1023); //metanal(formaldehido) del sensor wsp2110

  if(VRL<1.35)
  {
    voc=1228*(-0.1036 + sqrt(0.1036*0.1036-4*(-0.0037)*(0.6792-VRL)))/
    (2*(-0.0037));
```

```

    }
    else if(VRL>=1.35)
    {
        voc=1228*(VRL-1.15)/(0.02)
    }

```

```

return voc;
}

```

```

float dioxido(diox) //Función para calcular la concentración
{ //en ppm de CO2 del sensor MG-811

```

```

    VRL=diox*(5000/1023);

    if(VRL<308.42)
    {
        co2=exp((VRL-425.34)/(-17.35));
    }
    else if(VRL>=308.42)
    {
        co2=exp((VRL-464.64)/(-23.35));
    }
    return co2;
}

```

```

float monoxido(monox) //Función para calcular la concentración
{ //en ppm de CO del sensor MQ-7

```

```

    VRL=monox*(5/1023);

    if(VRL<4.32)
    {
        co=exp((VRL+1.5623)/(1.0663));
    }
    else if(VRL>=4.32)
    {
        co=(VRL-4.05)/(0.001);
    }
    return co;
}

```

```

float ozono(ozo) //Función para calcular la concentración
{ //en ppb de O3 del sensor MQ-131

```

```

    VRL=ozo*(5/1023);

    if(VRL>=2.5)
    {
        o3=(VRL-4)/(-0.0075);
    }
    else if(VRL<2.5)
    {

```

```

    o3=exp((VRL-5.0293)/-0.485);
}
return o3;
}

#int_RDA //Interrupción por llegada de datos vía RS232

void RDA_isr(
{
    Tc=getc(); //Llegada de datos del primer Xbee
    Hc=getc();
    VOCc=getc()

    CO2c=getc(); //Llegada de datos del segundo Xbee
    COc=getc();
    O3c=getc();

    Tk=getc(); //Llegada de datos del tercer Xbee
    Hk=getc();
    VOck=getc();

    CO2k=getc(); //Llegada de datos del cuarto Xbee
    COk=getc();
    O3k=getc();

    Tb=getc(); //Llegada de datos del quinto Xbee
    Hb=getc();
    VOcb=getc();

    CO2b=getc(); //Llegada de datos del sexto Xbee
    COb=getc();
    O3b=getc();

    temperatura(Tc); //Conversión de valores para las variables
    Tcm=t; //del espacio comunitario

    humedad(Hc);
    Hcm=hr;

    metanal(VOCc);
    VOCcm=voc;

    dióxido(CO2c);
    CO2cm=co2;

    monóxido(COc);
    COcm=co;

    ozono(O3c);
    O3cm=o3;

```

```
temperatura(Tk); //Conversión de valores para las variables
Tkt=t; //de la cocina
```

```
humedad(Hk);
Hkt=hr;
```

```
metanal(VOck);
VOckt=voc;
```

```
dioxido(CO2k);
CO2kt=co2;
```

```
monoxido(COk);
COkt=CO;
```

```
ozono(O3c);
O3kt=O3;
```

```
temperatura(Tb); //Conversión de valores para las variables
Tbr=t; //de la recámara
```

```
humedad(Hb);
Hbr=hr;
```

```
metanal(VOCb);
VOCbr=voc;
```

```
dioxido(CO2b);
CO2br=co2;
```

```
monoxido(COb);
CObr=CO;
```

```
ozono(O3b);
O3br=O3;
```

CM:

```
if(Tcm>=Tobj||Hcm<HRobjinf||Hcm>HRobjsup||VOCcm>=VOCobj||
CO2cm>=CO2obj||COcm>=COobj||O3cm>=O3obj)
{
  if(FLAGcm==1) //Comparación de los valores recibidos con
  { //los valores objetivo para el espacio
    goto KT; //comunitario
  }
  else
  {
    output_high(pin_C0); //ERVcm=1;
    FLAGcm=1;
    goto KT;
  }
}
else
```

```

{
  if(FLAGcm==1)
  {
    output_low(pin_C0);          //ERVcm=0;
    FLAGcm=0;
    goto KT;
  }
  else
  {
    goto KT;
  }
}

```

KT:

```

if(Tkt>=Tobj||Hkt<HRobjinf||Hkt>HRobjsup||VOckt>=VOCobj||
  CO2kt>=CO2obj||COkt>=COobj||O3kt>=O3obj)
{
  if(FLAGkt==1)                //Comparación de los valores recibidos con
  {                             //los valores objetivo para la cocina
    goto BR;
  }
  else
  {
    output_high(pin_C1);        //ERVkt=1;
    FLAGkt=1;
    goto BR;
  }
}
else
{
  if(FLAGkt==1)
  {
    output_low(pin_c1);         //ERVkt=0;
    FLAGkt=0;
    goto BR;
  }
  else
  {
    goto BR;
  }
}

```

BR:

```

if(Tbr>=Tobj||Hbr<HRobjinf||Hbr>HRobjsup||VOCbr>=VOCobj||
  CO2br>=CO2obj||CObr>=COobj||O3br>=O3obj)
{
  if(FLAGbr==0)                //Comparación de los valores recibidos con
  {                             // los valores objetivo de la recámara

```

```

        output_high(pin_c2);           //ERVbr=1;
        FLAGbr=1;
    }
}
else
{
    if(FLAGbr==1)
    {
        output_low(pin_c2);           //ERVbr=0;
        FLAGbr=0;
    }
}
}

void main()                           //Función principal
{
    enable_interrupts(GLOBAL);         //Habilitación de las interrupciones
    enable_interrupts(INT_RDA);        //Habilitación de la interrupción por llegada
                                        //de datos por el UART

    set_tris_a(0b00100000);
    set_tris_b(0xF0);                  //Configuración de los puertos como entradas (1)
    set_tris_c(0b10110000);          // o salidas (0)
    set_tris_d(0);
    set_tris_e(0b011);

    output_b(0);
    output_c(0);                       //Limpieza de los puertos
    output_d(0);
    output_e(0);

    Tobj=23;                           //Temperatura objetivo
    HRobjsup=52;                        //Límite superior de humedad relativa objetivo
    HRobjinf=43;                        //Límite inferior de humedad relativa objetivo
    VOCobj=20;                          //Concentración objetivo de compuestos orgánicos
    volátiles
    CO2obj=600;                         //Concentración objetivo de dióxido de carbono
    COobj=8;                            //Concentración objetivo de monóxido de carbono
    O3obj=80;                           //Concentración objetivo de ozono
    Twobj=49;                           //Temperatura objetivo del agua caliente

    while (true)                        //Bucle infinito de espera para recibir datos
    {
        if(input(pin_A5==0))           //Selección del control para las
        {                               //electroválvulas del calentador
            if(FLAGwh==1)              //eléctrico de respaldo
            {
                output_low(pin_B0);    //salida en bajo (0) o en alto(1)
            }
        }
    }
}

```

```

    output_high(pin_B1);           //EV1=EV3=WH=FLAGwh=0;
    output_low(pin_B2);           //EV2=1;
    WH=0;
    FLAGwh=0;
}
}

else if(FLAGwh==0)
{
    Tw = ds1820_read()+1;        //Tw = leer la temperatura del
                                // sensor digital ds18b20

    if(Tw>=Twobj)
    {
        output_low(pin_B0);      //EV1=EV3=WH=0;
        output_high(pin_B1);     //EV2=FLAGwh=1;
        output_low(pin_B2);
        WH=0;
        FLAGwh=1;
    }

    else
    {
        output_high(pin_B0);     //EV1=EV3=WH=FLAGwh=1;
        output_low(pin_B1);      //EV2=0;
        output_high(pin_B2);
        WH=1;
        FLAGwh=1;
    }
}
}
}

} //Cierre del ciclo while
} //Cierre de la función main

```