

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA WSN BAJO IEEE 802.15.4 PARA
SEGURIDAD Y MONITOREO DE VARIABLES

LIA SUSANA DEL CARMEN SILVA LOPEZ

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS
2007

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA WSN BAJO IEEE 802.15.4 PARA
SEGURIDAD Y MONITOREO DE VARIABLES

LIA SUSANA DEL CARMEN SILVA LOPEZ

Trabajo de Grado para optar al Título de
INGENIERO ELECTRÓNICO

Director
Msc. JUAN CARLOS MARTÍNEZ SANTOS
Profesor Tiempo Completo, Universidad Tecnológica de Bolívar

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS
2007

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena de Indias, (27/06/2007)

^_^ Con cariño para papá y mamá ^_^, que son las personas que más me quieren en el mundo; sin ustedes este documento no hubiese sido posible.

Curiosamente, mientras más "vieja" me pongo, más me doy cuenta de lo mucho que valen para mí. Aunque a veces sea complicado comprendernos, quiero que sepan que los quiero mucho.

Reconocimientos:

Lo primero que debo reconocer, es que hay una presencia, que lo ve todo, lo sabe todo, y lo puede todo...

*Y digo una presencia, porque para mí está presente. Y le doy gracias, porque cuanto más viva me siento, más la siento presente, a pesar de que lo más frecuente es que las personas la sientan cuando la muerte está cerca. Muchos llamamos Dios a esa presencia. Gracias, Dios, porque eres una presencia, porque me diste la vida, y porque para mi vida, eres mucho más que letra muerta y ecos que se pierden en el polvo de las edades. Esa presencia se ha manifestado, especialmente, en tres ángeles que me han acogido desde que llegué : vulnerable, apenas con piel, y del tamaño de lo que hoy en día son mis pies. Esos ángeles me abrazaron, me alimentaron (¡aunque a veces uno de esos angeles se comía mis galletas!), me protegieron y gracias a la educación que me dieron, mi piel es dura y mi corazón un músculo (porque sé que los sentimientos y la memoria emocional no vienen de allí, sino del hipotálamo y la amígdala) y cada día (lentamente) aprendo a vivir con mi piel dura y mi hipotálamo de mantequilla. Esos tres ángeles son mi Familia. Y a ellos, por sus esfuerzos, trasnochos, incomodidades, por mi causa, y por aquellas cosas que probablemente nunca me harán saber, Gracias, Padre, Madre, por tanta bondad y tanto esfuerzo, tantos buenos consejos, tanta paciencia y tanto amor. Trataré de retribuir tanta bondad en actos de tolerancia y de entendimiento mutuo, y de todas las formas que esta vida me lo permita, aunque de antemano sé que quizá se me acabe la vida y no termine. **ESTE TRABAJO ES PARA USTEDES.** Y Gracias “Mohosa”, aunque te comías mis galletas de niña y me robas las sábanas ahora creciditas ^_~; ¡te quiero mucho hermanita “extraterrestre”!.*

*A través de toda mi vida he encontrado otros ángeles. Comenzaré a enumerarlos. El primero que recuerdo es mi profesora de 2do grado, Elzibie Berdugo; fué una de las primeras personas que me trató como a un ser capaz de razonar. Después, primaria y bachillerato pasan rápido: concursos de declamación, tertulias de escritura, exposiciones científicas, recreos con mi agenda, perfiles psicológicos espurios por parte de psicólogas de Santas Buenas Pachangas, y mucho tiempo con mi PC; recuerdo cuando me dí contra una pared: los ICFES; gracias a Dios, erróneos, pero un ángel en ese momento fué la Dra Sofía Camacho de Covo, Rectora de mi Colegio, y la primera persona en poner en juego su nombre al escribir al ICFES, solicitando formalmente su revisión. Finalizando el bachillerato, el primer ángel que me recibió en la UTB, se llama Oscar Segundo Acuña Camacho; debió ser un momento cómico ver que la niña alta y roja como un camarón que se presentó en su oficina para entrevistas no se parecía mucho a la de la foto. Pero estoy segura que no hubiera podido entrar a estudiar en ésta (o alguna) Universidad con esos (erróneos) resultados del ICFES que llevé a esta entrevista, sin el Voto de Confianza de éste ángel en mi camino. Y eso lo agradezco de todo corazón. **¡Gracias, profesor Oscar, por ser el primero en confiar en la Universidad!**. Una vez en la Universidad, el choque no se hizo esperar. Herida en la pierna en pleno combate : perdí cálculo. Gracias a Dios seguí peleando (vacacional), y a través de los semestres me recuperé, pero no lo hice sola : a veces los ángeles vienen en forma de personas con sentido del humor negro y acento Santandereano. A partir de la mitad de mi carrera, un nuevo profesor de Análisis de Circuitos llegó a darnos clase. Se trataba de un “Ángel Búcaro” con un sentido del humor **muy, muy, muy negro**: éste ángel es Juan Carlos Martínez Santos. Y me enseñó varias lecciones muy valiosas, en tan diversas formas que no cabrían en estas dos hojas de reconocimientos que me he permitido incluir. Más importante, me mostró que yo también tengo **Alas...** **Gracias, profesor Juan Carlos**, por su guía, por dirigir mi tesis, aguantarse los “Lia Spam” en su correo, y por las muchas cosas buenas que hiciste, que seguramente jamás sabré. Y un ángel que es imposible que olvide, es “San Oscar” Acevedo Patiño. La delicadeza con que éste ángel*

*trata las esperanzas y los sueños de las personas, conservando los pies en la tierra, es algo que siempre admiraré. La dedicación casi paternal con que me aconsejó, la manera como siempre se las ingenia para mantener mis espíritus altos, son cosas que tengo que agradecerle... Seguramente tampoco me alcanzan estas dos páginas. **Gracias, San Oscar.** Hay ángeles que hicieron grandes contribuciones a mi educación y a éste trabajo, a los que quiero agradecer por : Las profesoras Sonia, que me introdujo a la programación en Ensamblador y los procesadores, y Gloria Isabel, que me enseñó a programar en C; el profesor William Cuadrado, "una experiencia inolvidable"; el profesor Eduardo Gómez, que me dió valiosos consejos en cómo estructurar un trabajo de grado, además de doble porción de Tópicos en Redes (de Alta Velocidad y Telemática); el profesor David Senior, con quien nunca tuve la oportunidad de dar clases, pero que su ayuda al momento de encargar las partes físicas de mi tesis fué ¡angelical! y un gran gesto; Gonzalo López, que me dió los fundamentos de las Comunicaciones; Jaime Arcila y Jose Luis Villa, por mostrarme lo bonito y aplicable que es el Control Automático. Al profesor Jaime Hernández, porque además de electrónica de potencia, con él aprendí a escribir informes de manera técnica y objetiva. Y a todos los profesores del programa con los que no dí materias, ¡muchas gracias!, porque siempre han estado ahí, y de alguna u otra forma siempre he sentido su buena voluntad para conmigo. ¡ Y Ramiro y Johnny, unos verdaderos ángeles con batas, hombro a hombro, ayudándonos a salir de apuros!, ¡GRACIAS!*

Tambien a mis compañeros. A pesar del elemento competencia, más de una vez también fueron ángeles, a mis amigos (Leonardo Bonilla, la rama IEEE) por su apoyo y consejos cuando tenía dudas.

*De todos, hay uno en especial; con él alternaba posiciones de Piloto y Copiloto, porque siempre podíamos confiar, y nos salvabamos la vida uno al otro. La confianza creció en una amistad muy bonita. Y esa amistad en algo más bonito todavía. Y quiero agradecerle el nunca querer cortar mis **Alas**: es una ráfaga de aire bajo ellas que me empuja más arriba, los actos hablan por sí solos; de los callejones más oscuros, éste ángel me ha ayudado a salir con su nobleza, racionalidad, esa gran capacidad de perdonar que yo desearía tener, y ese amor que transpira en sus actos. **Gracias Edison Ospina Mateus,** por ser mi refugio cuando parece que llueve en todos lados y que mi idioma no lo hablara nadie; por aguantarme los berrinches y cantaletas aunque algunas veces me equivoque; por quererme en las condiciones en que me quieres, y esforzarte por hacerme feliz en todas las formas que puedes, sobre todo en esas formas que valen realmente y no se consiguen con dinero.*

¡GRACIAS A TODOS LOS ÁNGELES EN MI VIDA!

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág</i>
<i>Indice de Figuras</i>	10
<i>Indice de Tablas</i>	15
<i>Indice de Ecuaciones</i>	17
<i>Glosario</i>	18
<i>Resumen</i>	28
<i>Introducción</i>	31
1. Fundamentación Teórica	36
1.1 Algunas Características de las WSN en el marco de éste trabajo	36
1.1.1 Caracterización de una Tecnología de Comunicación Util para Solucionar el Problema	45
1.2 Sobre el IEEE 802.15.4	45
1.2.1 Arquitectura del 802.15.4	54
1.2.2 Capa Física en IEEE 802.15.4	55
1.2.2.1 Frecuencia Central de cada Canal	57
1.2.3 Sub-Capa MAC en IEEE 802.15.4	57
1.2.3.1 Trama de Datos	58
1.2.3.2 Trama de Acuse de Recibo (ACK)	61
1.2.3.3 Trama de Comandos del MAC	61
1.2.3.4 Trama de Beacons	63
1.3 Sobre SMAC, Requerimientos y Bloques Funcionales	64

	<i>Pág</i>
1.3.1 Primitivas del SMAC	65
2. Diseño	68
2.1 Diseño y Selección de Interfaces Necesarias de Hardware	72
2.1.1 Selección de Capa Física	73
2.1.2 Interfaces Nodo Interruptor de Encendido	76
2.1.2.1 Diseño del Circuito Interruptor de Línea de Encendido	82
2.1.2.2 Diseño del Circuito de Control del Micro-Relay de la Bocina	90
2.1.3 Interfaces Nodo Sink	91
2.1.3.1 Interfaz para Display LCD	91
2.1.4 Interfaces con los Sensores en Nodos S1 y F2	93
2.1.4.1 Sensor para Nodo S1	93
2.1.4.2 Sensor para Nodo F2	97
2.2 Diseño del Software	99
2.2.1 Diagramas de Flujo para cada nodo	99
2.2.2 Descripción funcional del código fuente de SMAC	109
2.2.2.1 Funciones Importantes de archivos críticos del código fuente de SMAC	109
2.3 Otras Condiciones Esperadas: Patrones de Radiación	114
2.4 Diagramas Funcionales del Sistema Propuesto	117
3. Estudio de Tiempos de Vida de Baterías entre diferentes opciones de Alimentación	124
3.1 Pruebas de tiempo de Descarga Completa de	

Baterías en escenarios del Peor Caso	129
3.2 Pruebas de Voltaje de Baterías en un Tiempo dado, para Modelos de Entrega de Datos con Ahorro de Energía	146
4. Implementación	154
4.1 Compilación y Construcción de SMAC 4.1 sobre Freescale Codewarrior 5.0	154
4.2 Programación de los Módulos RF con la Aplicación final compilada	159
4.3 Dificultades resueltas en el momento de la implementación	164
5. Resultados y Observaciones	166
5.1 Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas	166
5.2 Tiempos máximos, mínimos y promedio de respuesta para Solicitudes de observador atendidas, para cada nodo	169
6. Conclusiones y Recomendaciones	174
7. Posibles Trabajos Futuros en los cuales evolucionar éste sistema	177
BIBLIOGRAFÍA	179
ENLACES A RECURSOS DE INTERÉS	181
ANEXOS	182

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1 Diagrama con bloques funcionales básicos de un nodo en una Red Inalámbrica de Sensores	22
Figura 2 Relación entre Características del Grupo C (verde) respecto a las del Grupo A (rosa)	40
Figura 3 Ilustración escenario del problema a Investigar: en Amarillo, posible ubicación del Nodo Sink. En Naranja, ubicación nodo Interruptor de Encendido	46
Figura 4 Arquitectura básica de un dispositivo 802.15.4	55
Figura 5 Canales de las bandas 868/915 Mhz.	56
Figura 6 Canales de la banda de 2.4 Ghz.	57
Figura 7 Trama de Datos en IEEE 802.15.4	60
Figura 8 Trama ACK en IEEE 802.15.4	61
Figura 9 Trama de Comandos del MAC en IEEE 802.15.4	62
Figura 10 Trama Beacon en IEEE 802.15.4	63
Figura 11 Bloques funcionales del SMAC	65
Figura 12 Ilustración de la ubicación final de los nodos que conforman al sistema	68
Figura 13 Vista Caja principal de Fusibles Daewoo Lanos	76
Figura 14 Relación de Ef2 y Ef3 con el encendido	78
Figura 15 Diagrama de Caja de Fusibles del Habitáculo	79
Figura 16 Sistemas que activa el Interruptor de Encendido 1 (IGN1)	81

Figura 17	Continúa con los Sistemas que activa IGN1	82
Figura 18	Esquemático del circuito Interruptor de Línea de Encendido	83
Figura 19	Intervención del Relay en la Línea de encendido	84
Figura 20	Simulación de un corto circuito entre las terminales 86 y 85 del relay	89
Figura 21	Isomérico del Micro-Relay de la Bocina (Derecha) y diagrama de las terminales del mismo (Izquierda)	90
Figura 22	Imagen del Termistor RL2007-1723-103-SA	93
Figura 23	Curva característica para el termistor empleado, según datos del fabricante y la ecuación de Steinhart-Hart	95
Figura 24	Interfaz Termistor para Microcontrolador	96
Figura 25	Acercamiento en la vecindad de 90°C del valor de resistencia del termistor, acorde con Figura 24	97
Figura 26	Diagrama empaquetado TO-92, integrado LM61	98
Figura 27	Diagrama de Flujo simplificado, comportamiento Nodo Sink.	103
Figura 28	Diagrama de Flujo simplificado, comportamiento Nodo F2 (acelerómetro)	105
Figura 29	Diagrama de Flujo, comportamiento simplificado de Nodos F1 y S1	108
Figura 30	Proceso de Transmisión de un dato, SMAC 4.1	112
Figura 31	Proceso de Recepción de un dato en SMAC 4.1	113
Figura 32	Patrón de Radiación Horizontal para Antena F (módulos Panasonic). (Cantidades en dBi)	115
Figura 33	Patrón de Radiación Vertical para Antena F (módulos Panasonic). (Cantidades en dBi)	116

Figura 34	Patrón de Radiación Horizontal, Antena de Dipolo Doblado (Tarjetas SARD de Freescale)	116
Figura 35	Patrón de Radiación Vertical, Antena de Dipolo Doblado (Tarjetas SARD de Freescale)	117
Figura 36	Diagrama de Conexiones en el Nodo Sink.	118
Figura 37	Diagrama de Conexiones del Nodo S1 (Temperatura Motor)	119
Figura 38	Diagrama Conexiones Nodo F2 (Temperatura Exterior)	119
Figura 39	Diagrama Conexiones Nodo F1 (Relay)	120
Figura 40	Diagrama de Estados del programa construido para correr el comportamiento en Nodo Sink	121
Figura 41	Diagrama de Estados del programa construido para correr comportamiento Nodo Relay (F1)	122
Figura 42	Diagrama de Estados del programa construido para correr el comportamiento en Nodo Acelerómetro (S1)	122
Figura 43	Diagrama de Estados del programa construido para el comportamiento de Nodo Sensor de Temperatura Motor (S1)	123
Figura 44	Diagrama de Estados del programa construido para el comportamiento en Nodo Sensor Temperatura externa (F2)	123
Figura 45	Pines para Alimentar Nodos PAN802154HAR00	125
Figura 46	Conectores para alimentar los Módulos SARD de Freescale	126
Figura 47	Gráfica de Voltaje de Batería contra Tiempo obtenida en Prueba 1, hasta descarga a 1.5V	134
Figura 48	Gráfica de Voltaje de Batería contra Tiempo obtenida en Prueba 3, hasta descarga a 2.2V	136
Figura 49	Gráfica de Voltaje de Batería contra Tiempo obtenida en Prueba 4, hasta descarga a 2.2V	137

Figura 50	Resultados en Contraste Pruebas de Duración de Baterías para <i>WORST CASE SCENARIO</i>	138
Figura 51	Tiempos de Duración en Contraste para Pruebas de Duración de Baterías para <i>WORST CASE SCENARIO</i>	138
Figura 52	Diagrama de Flujo simplificado del comportamiento del nodo de prueba para el MODELO DE ENTREGA DE DATOS POR SOLICITUD DEL OBSERVADOR (Pruebas 5-7 12-14)	142
Figura 53	Diagrama de Flujo simplificado del comportamiento del nodo de prueba para el MODELO DE ENTREGA DE DATOS POR EVENTOS EN VARIABLE SUPERVISADA (Pruebas 8-11)	143
Figura 54	Resultados en Contraste Pruebas de Duración de Baterías # 3 (Amarillo), #5 (Salmón), #6(Verde), #7(Fucsia), y #8 (Azul)	145
Figura 55	Interfaz Gráfica de Captura de Datos	147
Figura 56	Formas de Onda de prueba de los Voltaje de Batería ante tiempos de hibernación de 1s(aprox 0.96s, Naranja) 1.2s (aprox 1.15s, Azul Oscuro), 1.7s (aprox 1.74 s, Amarillo) a 4000 muestras/segundo (pruebas #12 - #14)	149
Figura 57	Gráfica de Voltajes de baterías después de 24 horas de uso para cada " <i>t_sleep</i> ": Amarillo, cada 1.5s. Azul, cada 1.2s. Naranja, cada 1s. (Pruebas #12-#14)	151
Figura 58	Gráfica de Voltajes de baterías después de 24 horas de uso para cada " <i>t_sleep</i> ". (40s en Aguamarina, 80s en Azul oscuro, y 120S en Naranja)	152
Figura 59	Pantalla de Apertura de archivos en Freescale Codewarrior 5.0	155
Figura 60	Comando desde donde se llama a la compilación	156
Figura 61	Mensaje de status del proceso de compilación	157

Figura 62	Reporte de Errores de Compilación/ enmarcado en color lila, el botón de "debugging"	158
Figura 63	Ubicación de los botones de "Debug" enmarcados en fucsia, desde donde se pueden programar los módulos	160
Figura 64	Interfaz HIWAVE para programar al Uc	161
Figura 65	Consola de información, proceso de programación	162
Figura 66	Hardware empleado para programar los módulos RF	163
Figura 67	Tiempos de Respuesta a solicitudes de Observador para cada Nodo	169
Figura 68	Porcentajes del Total de Muestras, para rangos de Tiempos de respuesta	170
Figura 69	Porcentajes de los tiempos de respuestas en el total de muestras para el Nodo ACC	171
Figura 70	Porcentajes de los tiempos de respuestas en el total de muestras tomadas para el Nodo Relay (F1)	172
Figura 71	Porcentajes de los tiempos de respuestas en el total de muestras tomadas para el Nodo (TEMP1)	172
Figura 72	Porcentajes de los tiempos de respuestas en el total de muestras tomadas para el Nodo (TEMP2)	173

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Ordenamiento en Grupos de algunas Características Importantes en las WSN	37
Tabla 2 Características Grupo A con su prioridad en la aplicación	47
Tabla 3 Características de Grupo A de algunas Tecnologías de Comunicación Inalámbrica	48
Tabla 4 Algunas Características del IEEE 802.15.4	52
Tabla 5 Identificadores de Comandos para Tramas de Comando	62
Tabla 6 Primitivas de SMAC	66
Tabla 7 Indicaciones de características en Fusibles de la Caja Principal, Daewoo Lanos. (Aquellos alimentados por 30 BAT+, se alimentan a su vez por el Main Fuse EF1. Para mayor información ver Figura 14)	77
Tabla 8 Tabla para el comportamiento del sistema que controla la interrupción de la Línea en Fusible Ef3	84
Tabla 9 Puertos del Uc, ubicación en la Línea de Jumpers principal de las SARD, y sus funciones en la interfaz LCD	92
Tabla 10 Rangos que lee el Conversor A/D en la tarjeta SARD, con los valores de los Acelerómetros en X-Y y Z	106
Tabla 11 Condiciones para las Pruebas de Descarga de Baterías en Nodos Panasonic (<i>Temperatura ~25°C</i>) - <i>Worst Case Scenario</i>	133
Tabla 12 Estimación de duración de cada tipo de baterías para el Modelo de Entrega de Datos	140

por Eventos en Variable, tomando **Tiempo_Rx + Tiempo_Tx= 0.009 s**

Tabla 13	Estimación de duración de cada tipo de baterías para el Modelo de Entrega de Datos por solicitud de observador, tomando Tiempo_Rx + Tiempo_Tx= 0.007 s , y asumiendo que siempre hay una solicitud del observador	141
Tabla 14	Función de cada pin en el cable Multilink empleado para programar los módulos RF	164
Tabla 15	Relación de Solicitudes Atendidas por Nodo a las Emitidas por el Sink para un <i>Duty Cycle</i> del 0.7% (tiempo de vida estimado con baterías AAA, aprox. 8 meses, 2 semanas)	168
Tabla 16	Relación de Solicitudes Atendidas por Nodo a las Emitidas por el Sink para un <i>Duty Cycle</i> del 1.2% (tiempo de vida estimado con baterías AAA, aprox. 5 meses)	168

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	Frecuencia Central Canal para $K=0$	57
Ecuación 2	Frecuencia Central Canal para $1 \leq K \leq 10$	57
Ecuación 3	Frecuencia Central Canal para $11 \leq K \leq 23$	57
Ecuación 4	Cálculos Relay	84
Ecuación 5	Cálculos Relay	86
Ecuación 6	Cálculos Relay	86
Ecuación 7	Cálculos Relay	87
Ecuación 8	Cálculos Relay	87
Ecuación 9	Cálculos Relay	87
Ecuación 10	Cálculos Termistor	94
Ecuación 11	Cálculos Termistor	94
Ecuación 12	Cálculos Termistor	94
Ecuación 13	Cálculos Baterías	128
Ecuación 14	Calculos Baterias	140

Glosario

- Alcance de Transmisión: En el marco de éste trabajo, esta es la distancia donde se puede establecer una transmisión con su acuse de recibo entre dos nodos, para la gran mayoría de veces que se intente establecer.
- Bluetooth: Tecnología de Comunicación Inalámbrica que trabaja en la banda de los 2.4Ghz, empleada inicialmente con el propósito de sustituir cables en aplicaciones de voz y datos, descrita por la especificación IEEE 802.15.1.
- Escalabilidad: Capacidad de una red de permitir que se reconozcan y agregen nuevos dispositivos a la misma.
- Flexibilidad de Pila de Protocolos: No es un parámetro precisamente medible. Es un parámetro que se obtiene cuando se comparan Pilas de Protocolos de diferentes tecnologías con las necesidades del problema, útil cuando se evalúa cual podría adaptarse mejor.
- GSM: Las siglas provienen de *Global System for Mobile Communications*, o Sistema Global para Comunicaciones Móviles, y es un estándar mundial para comunicaciones

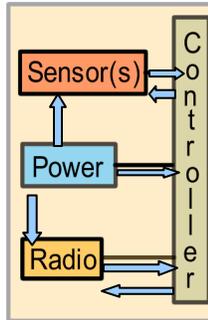
usado ampliamente en teléfonos móviles, desarrollado por la ETSI como el estándar predominante en comunicaciones telefónicas móviles para Europa. Cambia constantemente, a manera de generaciones (2.5G, 3G, 4G, etc) y entre generaciones hay distintas velocidades de transmisión de datos y calidad de comunicaciones por voz, desde algunos kbps hasta el ciento de Megabit por segundo para 4G.

- IEEE 802.15.4: Estándar del comité 802.15 (Comité que fija especificaciones para trabajar con redes de área personal o WPAN) del IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) que dicta como sería una *LR-WPAN* (*Low-Rate WPAN*) o Red de área personal de baja velocidad de transferencia.
- Latencia: Retraso existente entre la detección de un fenómeno de interés, y su presentación al observador.
- *Logic Link Control (LLC)*: El LLC se ubica en la subcapa superior de la capa de enlace con respecto al modelo de referencia *OSI*. Provee servicios a la capa de red y solicita servicios de la subcapa de acceso MAC a través del *SSCS* (ver siguiente ítem); es la responsable del control de enlaces lógicos, y sus funciones son independientes del protocolo MAC empleado [TEL].

- Longevidad del sistema: Puede ser definida como "el tiempo en que la mitad de los nodos de la red quedan sin energía", o "el tiempo en que la aplicación que corre a la red, tarda en dejar de proporcionar la información deseada" [TIL].
- MAC: *Media Access Control*. Capa de Control de Acceso al Medio. Se refiere a ésta subcapa que se encuentra en el nivel de la capa de enlace en el modelo OSI.
- Microcontrolador: En éste documento ésta palabra se abreviará como Uc. Un microcontrolador en un Circuito Integrado programable que ejecuta instrucciones secuencialmente, las cuales puede leer de su memoria interna, o de otras fuentes.
- Modelo de Entrega Condicionada por Eventos en Variable Supervisada: Este modelo se dá cuando la entrega de información al observador ocurre cuando hay un *evento de interés* para el observador en la variable supervisada.
- Modelo de Entrega de Datos Continua: Cuando una WSN presenta este modelo de entrega de datos, la red entrega datos continuamente, o en intervalos de tiempo cortos que pueden considerarse casi continuos.

- Modelo de Entrega de Datos por Solicitud de Observador: En este modelo la entrega de los datos en sensores, ocurre sólo cuando el observador (a través de alguna interfaz) muestra a la red su interés en la información.
- Modelo de Entrega Híbrido: Cuando coexisten dos o más modelos de entrega de datos (ver anteriores) puede decirse que se tiene un Modelo de Entrega Híbrido en el sistema.
- MODELO OSI: Modelo de la ISO (*International Standards Organization*) que representa en 7 niveles horizontales o capas a las interconexiones entre sistemas abiertos (*Open Systems Interconnection*). Éstas capas, de abajo a arriba son: Física, Enlace (que tiene a su vez la subcapa MAC), Red, Transporte, Sesión, Presentación y Aplicación.
- Nodo: En contexto de redes, es cada una de las entidades que se interconecta en la red.
- Nodo Sensor Inalámbrico: Entidades que al asociarse, conforman una WSN; generalmente están compuestos por un radio, y uno o un grupo de sensores conectado(s) en la misma tarjeta (o al menos a una muy corta distancia física entre sí, y que su estado sea transmitido por el mismo radio del nodo) como se puede observar en Figura 1.

Figura 1. Diagrama con bloques funcionales básicos de un nodo en una Red Inalámbrica de Sensores



Obtenida con: Macromedia Fireworks

- **Nodo Sink:** A veces se le puede conocer como **Nodo Coordinador**, pues muchas veces cumple esta función, aunque no necesariamente es así en todos los casos. Este nodo se caracteriza por que tiene una interfaz con el usuario a través de la que se le entregan datos, y porque generalmente todos los otros nodos le envían su información. Pueden haber varios de éstos nodos dentro de una misma WSN.
- **Observador:** Aquel usuario final interesado en obtener información diseminada en la red de sensores, acerca de un fenómeno. El observador (dependiendo de la funcionalidad de la red) puede indicar a la red interes en alguna variable (en inglés se le denomina a estas indicaciones "*Queries*" que literalmente podría traducir "Consultas"), y recibir respuesta a estas Consultas. Pueden existir varios

observadores en la red [TIL].

- **Peso en Código del nodo:** Cuando el protocolo de la red se compila y posteriormente se ensambla, este tiene un "peso" que se interpreta en este contexto como el número de bytes que tiene el archivo ensamblado (o compilado también, depende de cual sea de utilidad más inmediata, pues hay diversidad de compiladores y ensambladores que pueden dar resultados diversos al emplearse cruzadamente).
- **PHY:** Capa física de la tecnología con la que se está trabajando. Se refiere al nivel más bajo del modelo OSI.
- **Presición:** Obtener información lo suficientemente precisa, es el objetivo principal de un observador que emplee una WSN, quien decide cuanta presición necesaria es el diseñador, en base a características del problema y las necesidades del observador. Hay un *tradeoff* entre presición, latencia y eficiencia en uso de energía [TIL].
- **Primitivas (del SMAC):** En el contexto que se trabajará en este trabajo, es un conjunto de funciones básicas de comunicación y manejo de capa física sobre las cuales se construyen otras tareas más complejas que se pueden llevar a cabo con la SMAC.

- **Protocolo de Red:** Es el conjunto de reglas que especifican el intercambio de datos u órdenes durante la comunicación entre las entidades que forman parte de una red*; Conjunto de comportamientos por parte de los nodos de una red, que sirven para garantizar la llegada de información de un punto a otro de la misma.

- **RF-ID:** *Radio Frequency Identification*. Es una tecnología que emplea etiquetas (tags) que se adhieren a algún objeto, y contienen antenas de microcinta, las cuales al recibir energía en cierta frecuencia por parte de un aparato emisor-receptor, envían al mismo una información que éste requiera de la etiqueta. Hay etiquetas pasivas (que no necesitan alimentación), semi pasivas (requieren una pequeña batería, pero la memoria es muy limitada) y las activas, tienen memoria y pueden alcanzar rangos mayores que las etiquetas pasivas.

- **Sensor:** Elemento cuya función es la sensar el estado de una variable física y transformar esta información en señales eléctricas.

- ***Service Specific Convergence Sublayer (SSCS):*** Esta subcapa proporciona una interfaz entre una instancia de la subcapa *LLC* (IEEE 802.2) y la subcapa MAC del IEEE 802.15.4.

* http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_red

- SMAC: Simple Media Access Control. Es una implementación muy liviana de la subcapa MAC descrita por IEEE 802.15.4 construido por Freescale en lenguaje C, disponible a manera de código fuente. Tiene varias versiones, en el momento de redactar éste documento la versión vigente es la 4.1, sin embargo el conjunto de primitivas es practicamente el mismo que en la versión 2.1, con algunas mejoras en la implementación.
- Tolerancia a las Fallas: Es una característica de la red donde, a través de algoritmos o una configuración adecuada del hardware, se prevee una acción de contingencia ante posibles fallas.
- Topología de Red: Es la configuración que adoptan los nodos de una red para comunicarse entre sí. De acuerdo al medio (alambrado o no) y las características lógicas de los nodos puede (o no) depender de las conexiones físicas.
- *Tradeoff*: Palabra inglesa que literalmente traduce "compensación" al español. En el marco de este trabajo, un *tradeoff* es equilibrar los pros y contras de una situación, o de una característica con respecto a otra.
- Wi-Fi: Tecnología de Comunicación inalámbrica, empleada

para transferencia de información a altas tasas; es muy empleada para proporcionar internet en campus Universitarios y edificios de oficinas; descrita por las especificaciones 802.11X (donde X es a, b, g, etc).

- WPAN: *Wireless Personal Area Network*, o Red Inalámbrica de Área Personal. Es una red inalámbrica donde el área de cobertura individual de cada nodo es desde su inmediata cercanía, hasta aproximadamente 10 metros.

- WSN: Siglas en Inglés para "Redes Inalámbricas de Sensores" (Wireless Sensor Networks). Consiste en una red formada por nodos que contienen sensores, y su comunicación se hace sin emplear cables. Funcionalmente puede definirse como una herramienta usada para medición de estados de variables dentro de un fenómeno, donde la efectividad de la herramienta suele estar gobernada por la relación "performance vs deployment cost" (rendimiento vs costos de implementación).

- Zigbee: Estándar desarrollado por la Zigbee Alliance para aplicaciones de control en el hogar, la industria y la medicina, que emplea el MAC y la PHY de IEEE 802.15.4, pero definiendo una capa de Red y de Aplicación, tal que se permita compatibilidad entre dispositivos de distintas

marcas que trabajen sobre la pila de protocolos que defina este estándar. Varias de las compañías de ésta alianza liberan el Software Stack gratuitamente para desarrolladores.

- Z-Wave: Estándar propietario desarrollado inicialmente por Zen-Sys para aplicaciones de control en el hogar, que atrajo la atención de otras compañías grandes (como Logitech) y su incorporación a productos de éste tipo, con capacidades similares a las de Zigbee.

Resumen

En este trabajo de tesis se documenta el Diseño y la Implementación de una Wireless Sensor Network -Red Inalámbrica de Sensores-. El caso de aplicación fué en automóviles, concretamente el Daewoo Lanos 2002. La finalidad de elegir ésta aplicación en un automóvil, es probar las funcionalidades elegidas a través de una Red Inalámbrica de Sensores en a un automóvil que originalmente no las tenía.

Se propone un sistema de 5 nodos en topología estrella, discriminados por dirección MAC, con roles definidos.

* Un nodo Sink para mostrar datos en una pantalla LCD y permitir que el usuario interactúe solicitando datos.

* Un nodo Relay para evitar o permitir el encendido del automóvil y activar el relay de la bocina, dependiendo del estado de presencia o ausencia del nodo Sink, o de los comandos que reciba.

* Dos nodos sensores de temperatura, ubicados en distintas partes del automóvil, uno para temperatura exterior y otro para temperatura en el agua del motor en grados celcius (aditamentos de los que no dispone el automóvil empleado).

* Y un nodo con acelerómetros usado en una gorra por parte del conductor, que envía un comando de red dependiendo de si la cabeza del conductor está centrada hacia la vía, o está torcida indicando posible somnolencia.

Para éste diseño, se tuvieron en cuenta principalmente tres cosas: que el sistema diseñado hiciera un uso óptimo del tiempo de vida de batería, que fuera flexible tal que el usuario pudiera pedir información y al tiempo brindarle prioridad a cierto tráfico de aplicación en condiciones determinadas, y que fuera confiable en el sentido de que si se declaraba como perdido un nodo, lo estuviera generalmente por razones distintas a problemas de conectividad de la misma red.

El éxito de ésta implementación se mide en términos de dos parámetros: Relación de Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas, y Tiempos de respuesta para Solicitudes de observador atendidas.

La Relación de Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas del sistema final, estuvo entre el 96% para los nodos donde hubo solicitudes fallidas, y el 100% para los demás nodos.

Los Tiempos de Respuesta de Solicitudes Atendidas a Observador, oscilaron entre 0.25s y 4.15s, donde la mayoría de las veces oscilaba entre 1.01s y 1.5s (un 41.5% de las veces). En éste parámetro, el nodo con mayor porcentaje de respuestas entre 0.25s y 1s, fué el Nodo Fusible (56% de las veces), que también tuvo el mayor porcentaje de respuestas entre 0.25s y 1.5s (86% de las veces, sumando ambos porcentajes).

Se comprobó también que el Ciclo de Trabajo del encendido del Radio en el nodo, está relacionado con el Tiempo de Vida de las baterías, así como con la Relación de Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas.

Introducción

Hablar de WSN (Wireless Sensor Networks o Redes Inalámbricas de Sensores), es hablar de dos situaciones implicadas[HEI].

La primera, es trabajo colaborativo de los nodos de la red (con el objetivo de prevenir, inspeccionar o solucionar un problema).

La trascendencia de las características particulares del problema sobre la planeación de la aplicación final, sería la segunda situación implicada, pues la frase *Redes Inalámbricas de Sensores* lo único que indica es que se habla de un ente que enlaza sensores inalámbricamente, en otras palabras un rótulo genérico, que se ajusta a un problema particular.

Aquí los extremos de la balanza suelen ser entre un enfoque genérico y un enfoque ligado a las aplicaciones. Ambos extremos tienen sus beneficios y sus inconvenientes.

Entre los beneficios de un *enfoque demasiado genérico*, está el costo, al estar todas las soluciones "bajo la misma talla", facilitándose así la producción en masa y la

aplicación de soluciones "siguiendo la cartilla", lo cual puede en muchas circunstancias facilitar el trabajo del ingeniero, al no tener éste que pensar en más soluciones a aquella del manual. Los inconvenientes provienen de no poder ajustar la solución al problema, o de no poder tomar ventaja de algunas características del mismo en favor de la simplicidad o funcionalidad de la solución [KIL]; puede presentarse el peor de los casos, donde el problema tenga características que no sean nada compatibles con la solución genérica, y entonces si ésta no se aplica cuidadosamente, podría no ser eficiente o acarrear más problemas.

En el enfoque *ligado a la aplicación*, a pesar de que traería beneficios al permitir soluciones a la medida de la situación, podría traer inconvenientes como agotamiento de recursos, pues podría llegarse al punto de desarrollar una tecnología diferente (sea a nivel de Hardware, o de Software) para cada aplicación, perjudicando el bolsillo y avanzando a pasos muy lentos pues para cada problema habría un tiempo de desarrollo más largo que si se tuviera estandarización en el proceso.

Lo recomendable entonces, es balancear mesuradamente estos dos enfoques, a la hora de solucionar un problema usando WSN

[KUL, TIL]. Entonces, el axioma "Una sola talla no le queda bien a todos" sigue firme en nuestros días [LEE].

Con este norte, este trabajo se centra en estudiar y *aplicar* aspectos teóricos sobre redes inalámbricas de sensores, convirtiéndolos en una aplicación tangible. Hay mucha información disponible que debe tener un proceso de apropiación, y en un área que cambia tan rápido, a veces se tiene la sensación de estar reconstruyendo ideas constantemente.

Otra de las razones por las cuales se decidió trabajar en redes inalámbricas de sensores sobre automóviles, es porque programar comportamientos dependiendo de variables o eventos que se puedan sentir sea directamente a través de un sensor o indirectamente a través de características de la red, abre posibilidades que pueden llegar a causar impacto debido a la creciente concientización del público sobre la necesidad de mejorar la seguridad del transporte; si se continúan los esfuerzos de desarrollo en este campo, y de aterrizar las teorías, la mencionada mejoría podría ser una realidad.

Recientemente, en la edición de Marzo de 2007 del periódico

The Institute del IEEE*, El artículo de primera página de Ivan Berger, fué sobre una nueva familia de 4 estándares del IEEE para comunicación entre automóviles y estructuras de control en la periferia de las autopistas (IEEE 1609); estos 4 standards, denominados WAVE, son patrocinados por el Comité de Sistemas Inteligentes de Transporte de la Sociedad IEEE de Tecnología Vehicular, y los fondos provienen del propio Departamento de Transporte de los Estados Unidos; incluso la Comisión Federal de Comunicaciones le ha asignado una sección de 75Mhz en la banda de los 5.9Ghz.

Así que, conforme el público y los gobiernos del mundo tomen la iniciativa de seguir trabajando en mejorar la seguridad en el transporte, el interés en este tipo de trabajos crecerá.

El objeto de este trabajo es documentar el proceso de diseño y construcción de una red inalámbrica de sensores que va a estar limitada a 5 nodos, discriminados por dirección MAC y por dirección interna, como un mecanismo sencillo para limitar la red sólo a los nodos correctos.

Las *Success Metrics* de ésta red se describen posteriormente, en otras secciones del documento. No se espera de ésta red un

* [Http://www.ieee.org/theinstitute](http://www.ieee.org/theinstitute) Vol.31 No1, "Standards for Car Talk".

producto comercial inmediatamente, lo que se espera simplemente es demostrar que se puede construir, documentar cómo se construyó, y si es posible, generar una discusión sana sobre si la alternativa podría llegar a ser viable, entre personas que lean este documento, los papers y/o los posters de éste proyecto que se lleven a eventos.

En el documento, se hará una ampliación de la explicación sobre porqué se seleccionó una tecnología inalámbrica y no otra, de porqué se implementó en cierta manera y no en otra, se compartirán detalles (incluyendo dificultades técnicas que se tuvieron, y cómo se solucionaron) sobre cómo se diseñó e implementó la solución, los ajustes manuales que hayan tenido lugar, y los diagramas de flujo de comportamientos generales y particulares del sistema, entre otras; en las secciones de anexos se incluyen las rutinas más importantes del código fuente, hojas de datos, y otra información de utilidad.

1. Fundamentación Teórica

Los contenidos que se tratan en este capítulo, son los siguientes: primero se hablará sobre características generales que tienen las WSN, y parámetros que ayudan a definir qué características pueden ser útiles para los requerimientos del problema en que se emplee la herramienta WSN. Se relacionarán estas características junto con el problema a investigar y las condiciones reales del mismo, y a través de ésta relación, se explicará porqué se seleccionó esta tecnología, contrastándola con otras. Posteriormente, se profundiza en características FUNCIONALES del IEEE 802.15.4, a fin de que se tenga una referencia a mano para el momento en que se hable de cómo funciona el software de la WSN de éste proyecto.

1.1 Algunas Características de las WSN en el marco de este trabajo

Hay tantas formas de construir una WSN, como problemas que pueden estas solucionar. Recordando el contenido de introducción, a la hora de seleccionar una tecnología de

redes para esto (siempre y cuando el problema a resolver no demande el desarrollo de una completamente nueva), algunas características deben tenerse en cuenta[TIL], Ver Tabla 1.

Organizarlas y jerarquizarlas ayuda a tener claro qué se debe descartar o permitir en la solución que se plantee, para moldearla.

Tabla 1. Ordenamiento en Grupos de algunas Características Importantes en las WSN.

Grupo A	Grupo B	Grupo C
Alcance Transmisión	Entrega Continua	Manejo de la Energía (Longevidad del sistema)
Topologías Soportadas de Red	Entrega por Eventos en variable a supervisar	Latencia
Tasa de Transferencia	Entrega por solicitud de Observador	Presición
# de Dispositivos que soporta en red	Híbrida	Tolerancia a las Fallas
Peso en Código de nodo		Escalabilidad
Flexibilidad de Pila de Protocolos		Costos Finales (\$\$\$)

Grupo A: Características específicas de la tecnología de comunicación inalámbrica empleada para darle vida a la WSN.

Grupo B: [TIL]Una vez se selecciona la tecnología de redes, y se va a definir el comportamiento de la red, un factor importante es la manera como se recolecta y se entrega la información al observador. Por esto, se juntaron respecto a la manera de entregar los datos al observador.

Grupo C: Caracterizar el comportamiento de la red en términos de parámetros de rendimiento.

Las características en *Grupo A*, junto con el *Parámetro de Manejo de la Energía* en el *Grupo C*, son las que tuvieron más impacto tienen a la hora de *seleccionar* una tecnología de transmisión inalámbrica en el problema planteado.

Se observa que la mayoría de los parámetros en el *Grupo C* (relativas al rendimiento puro de la red) se pueden relacionar directamente con las características en el *Grupo A* (relativas a las capacidades de la tecnología de redes) a manera de Causa-Efecto (*Grupo A* ==> *Grupo C*) específicamente, como se observa en Figura 2.

La utilidad de encontrar estas relaciones, es poder tener un criterio más completo para seleccionar un conjunto de

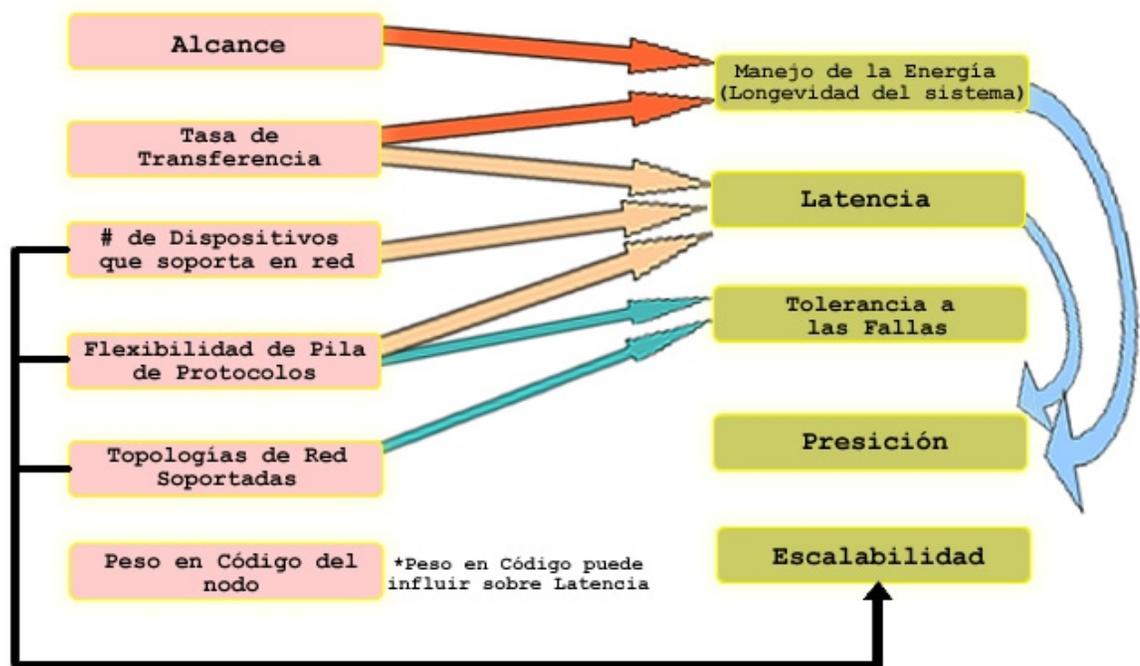
características en *Grupo A*, y con este, una tecnología de comunicación adecuada a las características de rendimiento que el problema planteado demande a la red. Cabe aclarar que hay características que no son relativas al rendimiento de la red que también entran a jugar en los *tradeoffs* que tiene que manejar una persona que desee diseñar una WSN, como aquellas referentes al almacenamiento de los datos sensados, a la dinámica del entorno en el que está la red, como si es en un entorno estático o si los nodos cambian de lugar, etc.

En la figura no aparece la característica Costo, pues se considera que TODAS las características influyen finalmente sobre el costo final al consumidor.

La longevidad del sistema[TIL], y la forma como se maneja la energía dependen directamente del alcance de cada nodo de la red, pues una forma de mejorarlo es aumentar la potencia que se le suministra al radio y esto podría implicar mayor consumo. También depende de la tasa de transferencia, pues a una tasa de transferencia constante y alta, suele hacerse necesario un tiempo de actividad mayor por parte del transmisor, y el receptor. Sin embargo, si se tiene una tasa de transferencia alta pero períodos activos de transmisión muy esporádicos y cortos, se puede ahorrar energía. Otro

factor que puede afectar la longevidad del sistema es cuando la tolerancia a las fallas de energía que tenga la red, y esto se ve a su vez influenciado por la inteligencia del protocolo, y por la topología de red.

Figura 2. Relación entre Características del Grupo C (verde) respecto a las del Grupo A (rosa).



Obtenida con: Macromedia Fireworks

Los tiempos de latencia dependen, además de factores como el medio de transmisión, fallas en alimentación y otras variables físicas, de cosas como:

- La tasa de transferencia, pues es de esperarse que en una red con alta tasa de transferencia, la latencia sea baja;

una latencia alta en una red con altas tasas de transferencia es un indicador de problemas en algún aspecto de la red.

- El número de dispositivos de la red, bajo cualquier topología, influencia la latencia. A veces se originan latencias cuando en topología estrella el coordinador se encuentra congestionado. También, en una red topología MESH, donde un mensaje muchas veces necesita enrutarse a través de varios nodos para llegar a su destino, el número de nodos por donde deba viajar el mensaje, mientras mayor sea, suele hacer mayor el tiempo de latencia.

Claro que si hay muchos nodos en una red, pero es una red densa y de poca área (respecto al alcance de cada nodo de la red), es probable que la latencia sea menor si se tiene un algoritmo de enrutamiento con la inteligencia para aprovechar la cercanía física de los nodos.

- La flexibilidad de la Pila de protocolos también influye. Si se tiene una pila de protocolos con muchas capas, el tiempo de procesamiento suele aumentar, dado que los nodos tienen una capacidad de procesamiento limitada, y este aumento de trabajo puede visiblemente influenciar el

tiempo que se demore en enviar, recibir o procesar un mensaje al retransmitirlo o antes de enviarlo, etc.

En cuanto a la Tolerancia a las Fallas[TIL], puede requerirse una pila de protocolos con la solidez para resistir fallas no catastróficas en el sistema, y funcionar a pesar de las mismas mientras se solucionan, pues si bien una red de sensores forma un camino entre información de un fenómeno y un observador, la función del protocolo de la red es mantener este camino (o múltiples caminos) bajo condiciones que pueden cambiar en un momento dado, y convertirse en una falla.

Dependiendo de la falla, hay distintas maneras de hacer a un protocolo resistente a las fallas. A veces la topología de red ayuda a sortear la falla, y a veces es un inconveniente.

En cuanto a las características del **Grupo B**, que son básicamente modelos de entrega de datos a través de los que se puede también caracterizar una WSN, el usar uno u otro modelo depende de varios factores.

Un factor con mucho peso en la decisión, son las necesidades que tenga el observador para recibir la información, o las

necesidades que tenga un sistema que decida en base a la información que se obtenga en la WSN. Otro factor con que se debe tener muy en cuenta, es el manejo de la energía.

Estudios anteriores [POT], muestran que aproximadamente 3000 instrucciones pueden ser ejecutadas por el mismo costo en energía de enviar a 100 metros un solo bit de información. Naturalmente, esta cantidad puede variar dependiendo de las características de la unidad que ejecuta las instrucciones y la unidad que hace los envíos; sin embargo esta relación sirve como una referencia para concluir que es menos costoso en cuanto a consumo de energía apagar el radio y transmitir información sólo cuando sea necesario.

En este orden de ideas, el modelo de entrega de datos que suele consumir más energía tanto en Nodos Sensores, como en Nodos Sink suele ser el de Entrega Continua, pues el transmisor está constantemente encendido, y los sensores constantemente sensan. Podría seguirle el de Entrega por Solicitud de Observador, pues el receptor de los Nodos Sensores debe estar despierto constantemente, o al menos despertarse en intervalos de tiempo adecuados que se deben estimar para que se pueda tener una respuesta a las solicitudes del observador. Sin embargo, este modelo no

demanda demasiado consumo de energía por parte de Nodos Sink, pues el radio sólo se enciende cuando el Observador desea transmitir un comando a la WSN. Y por último podría seguirle el modelo de Entrega por Eventos en Variable a Supervisar, pues el radio transmisor en los Nodos Sensores sólo se enciende cuando haya información que transmitir al Nodo Sink. Este sería el caso contrario al Modelo descrito en el párrafo inmediatamente anterior. Se dice que gasta menos energía que el anterior, pues el gran gasto de energía se hace en los Nodos Sink, que suelen ser menos que los Nodos Sensores.

Cabe aclarar que esta jerarquía de consumos planteada dependiendo del modelo, también depende del consumo de los sensores. Si los sensores consumen más energía que los radios, entonces el modelo de Entrega por Eventos en Variable a Supervisar puede llegar a consumir más energía en los Nodos Sink, que el modelo de Entrega por Solicitud de Observador, pues en el primer caso se dejan encendidos constantemente los sensores, y en el segundo sería posible encenderlos sólo cuando el Observador solicite información de la variable, ahorrando de ésta manera energía.

Entonces, para determinar la influencia de uno u otro modelo de entrega de datos, finalmente debe determinarse de acuerdo

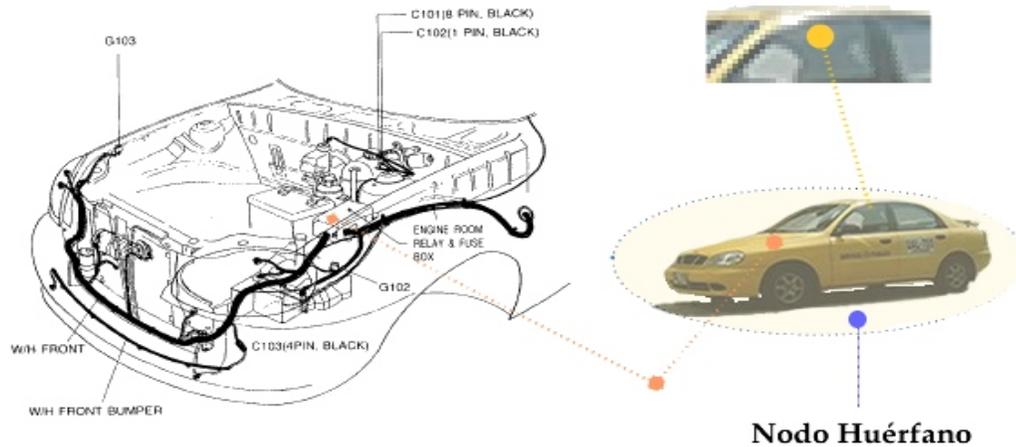
a las características de la aplicación[HEI,TIL].

1.1.1 Caracterización de una Tecnología de Comunicación Util para Solucionar el Problema a Investigar

Se busca construir una red inalámbrica que sirva como herramienta para manejar información adquirida por sensores de distinto tipo, además de la detección de un nodo especial al que se le llamará "Nodo Sink" o Huérfano, cuya presencia condicionará el encendido del automóvil. Ver Figura 3.

Además, como premisa de diseño, los nodos no podrán ser más de 5, discriminados por dirección MAC. El automóvil que servirá para las pruebas, será un Daewoo Lanos 2002.

Figura 3. Ilustración escenario del problema a Investigar: en Amarillo, posible ubicación del Nodo Sink. En Naranja, ubicación nodo Interruptor de Encendido.



Obtenida con: Macromedia Fireworks.

A partir de las características del problema, se empleará una escala de (1) a (3) siendo (1) "Prioridad Crítica", (2) "Deseable" y (3) "Poca Prioridad" para dar una escala de prioridades a las características Grupo A que se tendrán en cuenta en este trabajo para seleccionar una tecnología de comunicación inalámbrica:

- a) Area de cobertura: NO DEBE SER AMPLIA, pues uno de los objetivos es condicionar el encendido del automóvil a la cercanía del dueño.
- b) La Tasa de transferencia no tiene que ser alta.
- c) El Número de Dispositivos en Red que debe soportar la red es de al menos 5.
- d) En cuanto a la Flexibilidad de la Pila de Protocolos,

dado que un objetivo es suministrar información al usuario, y que los nodos están físicamente cerca el uno al otro, una Topología de Red Apropriada sería EN ESTRELLA. Además la tecnología seleccionada debe soportar y permitir restringir el número de nodos por su dirección MAC.

e) Es útil que el sistema Administre Inteligentemente su Energía, para evitar cambios constantes de baterías.

f) Es deseable que la tecnología seleccionada sea Económica en su inversión inicial.

En Tabla 2 se observan éstas características con su respectiva prioridad en la aplicación.

Tabla 2. Características Grupo A con su prioridad en la aplicación.

Característica Grupo A	Prioridad
Area de Cobertura	2
Tasa de Transferencia	3
Número de Dispositivos en Red	2
Flexibilidad de la Pila de Protocolos	1
Administración Inteligente de la Energía	2
Economía	1

En Tabla 3 se observan algunas tecnologías comerciales de transmisión inalámbrica con características del **Grupo A** a modo de comparación.

Tabla 3. Características de **Grupo A** de algunas Tecnologías de Comunicación Inalámbrica.

Market Name	ZigBee™	---	Wi-Fi™	Bluetooth™	Z-Wave(TM)	RF-ID
Standard	802.15.4 + App & NWK Layer	GSM/GPRS CDMA/1xRTT	802.11 X	802.15.1		
Application Focus	Monitoring & Control	Wide Area Voice & Data	Web, Email, Video	Cable Replacement	Monitoring & Control	Identification, Monitoring
System Resources	4KB - 64KB	16MB+	1MB+	250KB+	4KB - 64 KB	Not Standardized
Battery Life (days)	100 - 1,000+	1-7	.5 - 5	1 - 7	100 - 1,000+	Limited to the Reading Unit
Network Size	Unlimited (2 ⁶⁴)	1	32	7	232+	Limited to the Reading Unit
Bandwidth (KB/s)	20 - 250	64 - 128+	11,000+	720	9.6 - 40	16 - 80
Transmission Range (meters)	1 - 100+	1,000+	1 - 100	1 - 10+	1 - 30	0.5 - 10+
Success Metrics	Reliability, Power, Cost	Reach, Quality	Speed, Flexibility	Cost, Convenience	Reliability, Power, Cost	Reliability, Cost

Fuente: [<http://www.zigbee.org/en/about/faq.asp#6>, completada con información de Z-wave y RF-ID]

En cuanto al *tradeoff* entre Tasa de transferencia y Alcance con Duración de Batería (importante pues en un automóvil no se tiene un suministro de energía de la Red Eléctrica Local), las tecnologías que se descartan serían GSM, Wi-Fi y Bluetooth (Tabla 3), pues son las que tienen menor vida de baterías.

Ahora, otra razón para descartar las anteriores es el costo. En cuanto a Bluetooth, un módulo de trabajo cuesta entre US\$130 y US\$99, y con Wi-Fi se tienen precios similares. Entonces, 5 nodos serían US\$495, mas costos de envío y hardware de desarrollo, US\$695 al menos.

Quedan RF-ID, Z-Wave y Zigbee. Entonces, los factores costo y flexibilidad de pila de protocolos, entran a jugar. A la luz de esta comparación, la tecnología que probablemente sería más liviana de implementar, sería Z-Wave. Cada nodo de desarrollo cuesta entre US\$50 y US\$300. Si se compran 5 nodos mas costos de envío, a un precio intermedio (aproximadamente US\$170 cada nodo) se estaría hablando de US\$850, sin contar costos de envío, hardware de desarrollo, y hardware de interfaces, que lo pueden elevar a US\$1050 o mucho más, considerando que Z-wave es un estándar desarrollado por varias compañías privadas (Zen-Sys, Logitech y otros).

Para Z-wave, no se liberan paquetes de desarrollo al público (o hasta la fecha no se han comercializado ampliamente) sinó que se liberan soluciones propietarias, y las compañías que participan del estándar, las incorporan a sus productos. Por esta razón, no es factible su implementación para este tipo de trabajo.

Respecto a RF-ID, un Lector cuesta entre US\$3000 (modelos comerciales con empaque e interfaces para alimentación y control) y US\$340 (un módulo que es sólo la tarjeta); En cuanto a las Etiquetas, se venden por centena a precios

entre US\$65 y US\$105, dependiendo del tipo de Etiqueta. Sin embargo, se vende un paquete de demostración con 5 Etiquetas de distintos tipos en US\$19. Así que, si se adquieren las 5 Etiquetas con la unidad lectora, el precio sería de US\$359. Más envío, más costos de partes adicionales y de interfaces de desarrollo, se habla de al menos US\$559.

Finalmente, queda Zigbee. Zigbee es un estándar hecho por la Zigbee Alliance, donde se toman el MAC y el PHY del estándar IEEE 802.15.4, y se añaden una capa de red y una de aplicación; sin embargo, por costos se habla del mismo Hardware. Los módulos de desarrollo de Zigbee van desde US\$19 hasta US\$100, pero la mayoría de los nodos cuestan menos de US\$30. Suponiendo US\$20 dólares por nodo, serían US\$100 los 5 nodos. Más costos de envío, hardware de desarrollo e interfaces, podría hablarse de US\$300.

Comparando precios y funcionalidades del Hardware de IEEE 802.15.4 y RF-ID, otro factor de gran importancia es la Flexibilidad en la pila de protocolos. El inconveniente de emplear RF-ID para esta aplicación, es que los recursos (incluso en las etiquetas que no sean pasivas) son sumamente limitados, cuando de darle inteligencia a los nodos sensores se trata. Si la aplicación sólo fuera transmitir la

información de un sensor cuando se lea el dispositivo, probablemente RF-ID sería una opción excelente. Sin embargo, como también se esperan reacciones por parte de los nodos sensores respecto a la cercanía o no del Nodo Sink, entonces se convierte en una tarea que es más idónea para trabajar en Zigbee. Además que por precios, es más económico.

Entonces, entre RF-ID y Zigbee, el ganador es Zigbee por ser más flexible y económico (considerando el tamaño de la red).

En la practica, se trabajará sobre una versión ultra-liviana del MAC de 802.15.4 llamada SMAC (liberado por Freescale), pues demanda menos peso en código que trabajar con la pila de protocolos completa de Zigbee; además SMAC permite que el desarrollador trabaje su propio protocolo de red con más libertad, y esto para la aplicación es una ventaja ya que hasta la fecha, no hay un perfil de zigbee para este tipo de aplicaciones.

El único *tradeoff* que se encontró limitante para SMAC, es que requiere que se trabaje sobre hardware Freescale. Sin embargo, se tiene una buena variedad para seleccionar Hardware.

1.2 Sobre el IEEE 802.15.4

En el año 2000 dos grupos especialistas en estándares (ZigBee Alliance y el grupo de trabajo IEEE 802) se unieron para dar a conocer la necesidad de un nuevo estándar para redes inalámbricas de bajo consumo y de bajo costo para aplicaciones domóticas e industriales, dando como resultado un nuevo estándar para áreas personales (LR-WPAN, Low Range Wireless Personal Area Network) que ahora se conoce como el IEEE 802.15.4 [MAY]. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Algunas Características del IEEE 802.15.4

<i>Bandas de Frecuencia y Rangos de Transmisión de Datos:</i>	868 MHz: 20kb/s; 915 MHz: 40kb/s; 2.4 GHz: 250 kb/s.
<i>Alcance:</i>	0-10 [m], extensible a 20m.
<i>Latencia:</i>	Por debajo de 15ms.
<i>Canales:</i>	868/915 MHz: 11 canales. 2.4 GHz: 16 canales.
<i>Modos de Direccionamiento:</i>	Todo chip tiene 64 bits de direccionamiento IEEE.
<i>Acceso al canal:</i>	CSMA-CA (Carrier Sense, Multiple Access - Collision Avoidance).
<i>Seguridad:</i>	Por niveles, hasta AES 128.
<i>Tamaño de la Red:</i>	Hasta 2^{64} dispositivos.
<i>Rango de Temperatura ambiente:</i>	-40 a 85 [°C]

Fuente: [MAY]

Éste estándar fué establecido, pues dentro del hogar y en la industria, hay muchas aplicaciones que pueden necesitar comunicación; por ejemplo redes de audio, automatización del hogar y seguridad. Cada aplicación tiene sus costos, necesidades de ancho de banda, y procedimientos de instalación, y se vió la necesidad de buscar una estandarización en éstas comunicaciones.

Las aplicaciones de Automatización (del hogar o edificios) y aplicaciones de seguridad no necesitan gran tasa de transferencia, ni protocolos pesados, como sería el caso de transmisión de video o volúmenes grandes de información. Por ejemplo, si se coloca un detector de temperatura en un lugar, la temperatura no suele variar rápidamente por lo que solo es necesario enviar datos unas pocas veces por hora.

Este tipo de aplicación se manejaría muy bien con un enlace inalámbrico de baja potencia y baja transferencia de datos, pues el uso de cables sería engorroso y con un alto costo de instalación. Además se prefiere que los aparatos consuman muy poca energía para evitar el cambio constante de las baterías.

Este estándar permite un rango flexible de funcionalidad en las aplicaciones, desde muy básicas (usando sólo algunas de

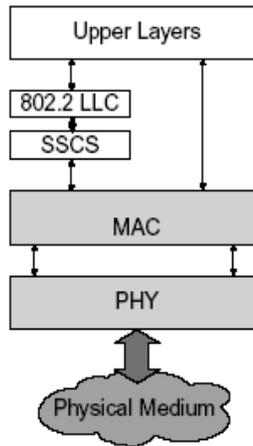
las primitivas de servicios para ahorrar código y así bajar costos) como es el caso concreto de este trabajo, hasta aplicaciones más complejas que requieran funcionalidades como encriptación, redes guiadas con tramas "beacon", ranuras de tiempo garantizadas, sincronización, etc.

1.2.1. Arquitectura del 802.15.4

Según la arquitectura propuesta en [STD], un dispositivo LR-WPAN comprende a una Capa Física (PHY) que contiene el radio transmisor/receptor en las frecuencias adecuadas, junto con su mecanismo de control de bajo nivel, y comprende también una Subcapa MAC (Medium Access Control) que provee un canal de acceso al medio físico para los tipos de mensajes requeridos (Ver Figura 4).

Las capas superiores de Figura 4, consisten en capa de red (que actúa sobre la configuración, manipulación, y enrutamiento de los mensajes de la red), y la capa de aplicación, que es aquella que controla las funciones del dispositivo como tal. La definición de éstas es responsabilidad del programador.

Figura 4. Arquitectura básica de un dispositivo 802.15.4



Fuente: [STD]

Esta arquitectura puede implementarse bien en un dispositivo embebido como un microcontrolador, o incluso como un radio que cumpla con las características del PHY, y con el soporte de un dispositivo externo, como un Computador, un PDA, etc.

Las capas superiores pueden comunicarse con la Subcapa MAC (la cual se divide en dos entidades, una para manejar datos y otra para comandos, pero eso se verá después) a través de el Logic Link Control (802.2 LLC) y este a su vez sobre el Service Specific Convergence Sublayer (SSCS).

1.2.2 Capa Física en IEEE 802.15.4

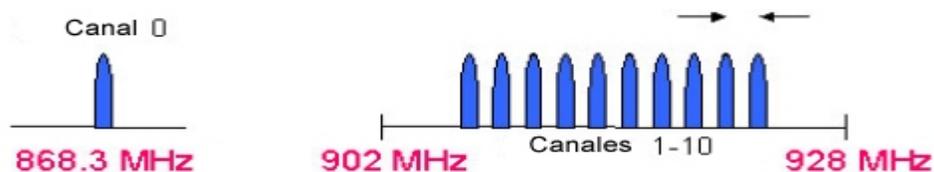
IEEE 802.15.4 ofrece dos opciones de capa física (PHY): La

capa física a 2.4 GHz, que prácticamente está disponible en todo el mundo, y permite una transmisión de 250 kb/s; y la capa física a 868/915 MHz, que ofrece rangos de transmisión de 20 kb/s y 40 kb/s respectivamente; la banda de 865 MHz es válida en Europa y la de 915 MHz en Estados Unidos.

Ambas se basan en métodos de Secuencia Directa de Espectro Extendido (DSSS), y comparten la misma estructura básica de paquetes de low-duty-cycle, para bajo consumo de energía.

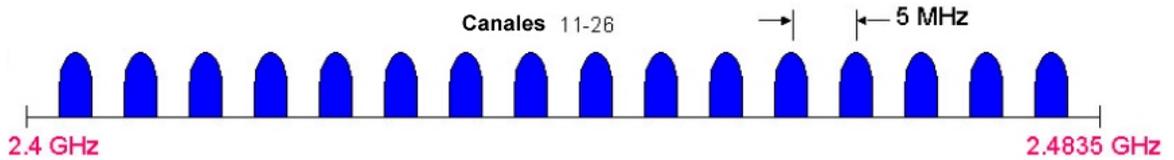
La capa física a 868/915 MHz, soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 Mhz (Ver Figura 5). Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy poco probable que una sola red utilice los 11 canales. La capa física a 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz), como se puede apreciar en Figura 6.

Figura 5. Canales de las bandas 868/915 Mhz.



Fuente: [MAY]

Figura 6. Canales de la banda de 2.4 Ghz.



Fuente: [MAY]

1.2.2.1 Frecuencia Central de cada Canal

La frecuencia central para cada canal se define a continuación, por las ecuaciones (1), (2) y (3), en donde k es el número del canal.

$$F_c = 868.3 \text{ [Mhz]}, \text{ para } k = 0 \quad (\text{EQ1})$$

$$F_c = 906 + 2 (k - 1) \text{ [Mhz]}, \text{ para } k = 1, 2, \dots, 10 \quad (\text{EQ2})$$

$$F_c = 2405 + 5 (k - 11) \text{ [Mhz]}, \text{ para } k = 11, 12, \dots, 26 \quad (\text{EQ3})$$

Sobre la coexistencia con otras tecnologías de redes, se recomienda ver en [STD] el anexo E (Coexistence with other IEEE standards and proposed standards).

1.2.3 Sub-Capa MAC en IEEE 802.15.4

La Subcapa MAC provee dos servicios; el servicio de Datos, que permita la transmisión y recepción de Unidades de Datos

de Protocolo (MPDUs) desde la PHY, el cual se accesa a través del MCPS-SAP (MAC Common Part Sublayer - Service Access Point); y el servicio de Administración (Management), a través del cual se transmiten comandos del protocolo, al cual se accede por el SAP (Service Access Point) de la Entidad de Administración de Subcapa MAC (MLME - Mac Layer Management Entity) llamado MLME-SAP. El MLME tiene 26 primitivas.

Las funciones de la Subcapa MAC son Asociación, Disasociación, Manejo y validación de Marcos de Administración de red, manejo de la característica de Ranuras de Tiempo Garantizadas, manejo de la sincronización, emplear el mecanismo CSMA-CA para acceso al canal, entre otras. Esta Sub-Capa MAC soporta 4 tipos de tramas, que son la Trama de Datos, la Trama de Acuse de Recibo (ACK), la Trama de Comandos del MAC, y la Trama de Beacons (trama especial de guía de red).

1.2.3.1 Trama de Datos

La estructura básica de la trama de Datos puede apreciarse en Figura 7. La trama general de MAC se la denomina PPDU (Phy Protocol Data Unit).

La trama empieza con un encabezado de sincronización (SHR, Synchron Header), seguido de un encabezado de capa física para indicar longitud de paquete (PHR, Phy Header), y después unos bits la capa física de la unidad de servicio de datos (PSDU, Phy Service Data Unit, PSDU) [MAY].

El preámbulo, de 32 bits, está diseñado para la adquisición de símbolos y para los tiempos de chip; dentro del encabezado de la capa física (PHR), se utilizan 7 bits para especificar la longitud de la carga de datos (en bytes). La longitud de paquetes va de 0 a 127 bytes.

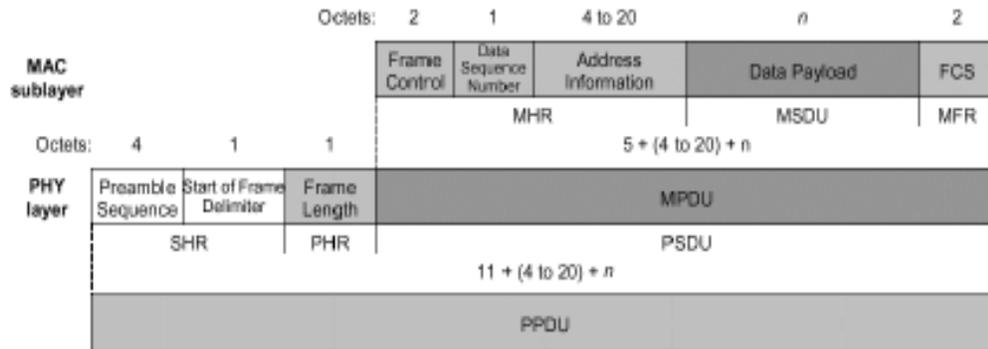
La trama de Unidad de Datos del Protocolo MAC (MPDU, MAC Protocol Data Unit), se compone de:

- Encabezado MAC (MHR, MAC Header)
- Unidad de Servicio de Datos del MAC (MSDU - MAC Service Data Unit)
- MFR - Mac Footer

Al MHR, lo componen los campos de Frame Control, que especifica como es el resto de la trama de datos y que es lo que contiene; Data Sequence Number, a través del cual se

verifica la integridad de la trama.

Figura 7. Trama de Datos en IEEE 802.15.4



Fuente: [MAY]

En el campo Address Information, el tamaño de las direcciones puede variar entre 0 y 20 bytes, por ejemplo, una trama de datos puede contener información de la fuente y del destinatario, mientras que la trama "ACK" no contiene ninguna información de ninguna dirección.

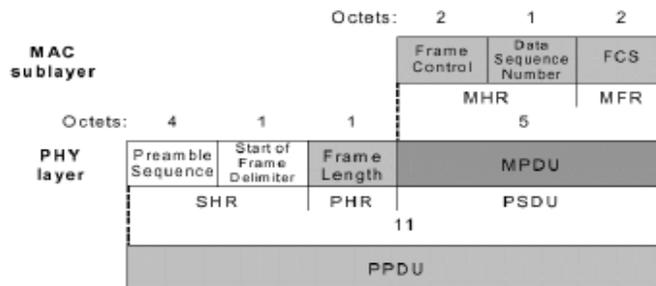
Por otro lado una trama de guía solo tiene información de la dirección de la fuente. Después, el Payload, que es el MSDU, tiene longitud variable, teniendo en cuenta que la trama completa de MAC no debe de exceder los 127 bytes de información. Finalmente, el MFR contiene al FCS (Frame Check Sequency), que es un campo de chequeo de 16 bits CRC (Cyclic Redundancy Check) [MAY] [Pag. 115, STD].

1.2.3.2 Trama de Acuse de Recibo (ACK)

La trama de ACK se usa por el receptor de un mensaje anterior para avisar al emisor de éste, que fué recibido sin errores.

Observar en Figura 8. que esta trama consta únicamente de 11 octetos con funciones diferentes, y que introducir una dirección MAC (la cual mide 64 bits) requiere al menos de 8. Esto quiere decir, que si se desea saber exactamente de qué radio vino el mensaje, se necesita recibir otro mensaje del mismo radio, con una trama distinta a la ACK.

Figura 8. Trama ACK en IEEE 802.15.4



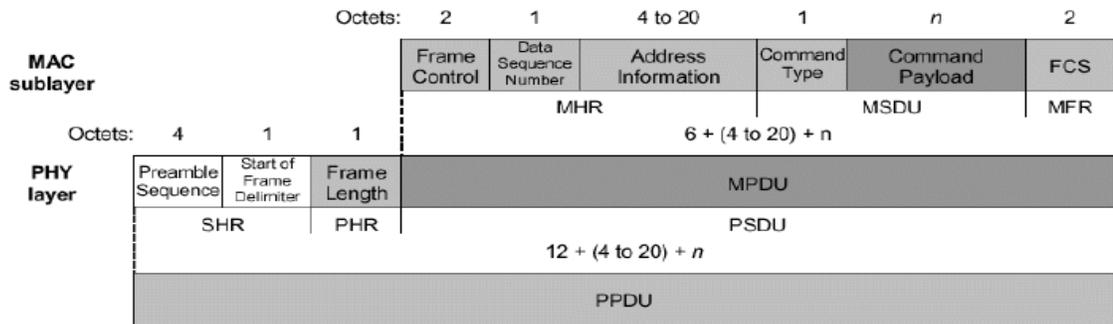
Fuente: [MAY]

1.2.3.3 Trama de Comandos del MAC

La Trama de Comandos (ver Figura 9) permite transmitir comandos por parte de un Nodo que sirva de Coordinador hacia otros nodos. Basicamente es el ACK con los campos de Address

Information, Command Type y Command Payload. El campo Command Type se llena con los identificadores de comando en Tabla 4.

Figura 9. Trama de Comandos del MAC en IEEE 802.15.4



Fuente: [MAY]

Para información detallada de cada comando en Tabla 5, se puede consultar en páginas 123-133 de [STD].

Tabla 5. Identificadores de Comandos para Tramas de Comando

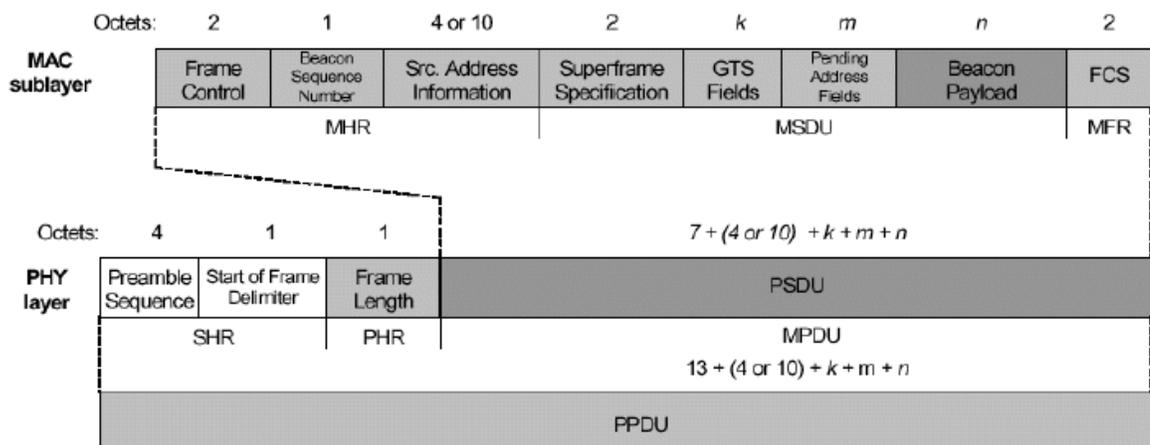
Command frame identifier	Command name
0 x 01	Association request
0 x 02	Association response
0 x 03	Disassociation notification
0 x 04	Data request
0 x 05	PANID conflict notification
0 x 06	Orphan notification
0 x 07	Beacon request
0 x 08	Coordinator realignment
0 x 09	GTS request
0 x 0a—0 x ff	Reserved

Fuente: [STD]

1.2.3.4 Trama de Beacons

La trama Beacon es una trama especial que emiten los coordinadores de red, para lograr la sincronización de los dispositivos de la red. Los radios en los nodos pueden despertarse solamente cuando es transmitida una señal de guía, es decir, una trama Beacon, escuchar su dirección y si no la escucha volver a estado dormir, ahorrando así poder. El formato de una Trama Beacon se observa en Figura 10. Las tramas Beacon permiten otras funcionalidades, como los SuperFrames y los Guaranteed Time Slots o Time Slots Garantizados.

Figura 10. Trama Beacon en IEEE 802.15.4



Fuente: [MAY]

En un Superframe, un coordinador de red o coordinador PAN,

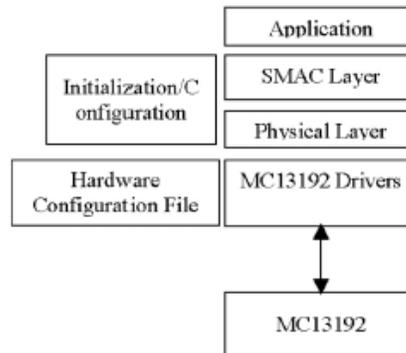
transmite Superframes de guía (beacon) en intervalos definidos. Estos intervalos pueden ser tan cortos como 15 ms o tan largos como 245 s. El tiempo entre cada uno de ellos se divide en 16 "time slots", independientes a la duración de cada Superframe. Un aparato o un instrumento puede transmitir cuando sea durante su "time slot". Pero debe terminar su transmisión antes de la siguiente Superframes de guía. Sin embargo el coordinador de PAN puede asignar intervalos o "time slots" a un solo aparato que requiera un determinado ancho de banda permanentemente o transmisiones de baja latencia. Estos "time slots" asignados son llamados "time slots" garantizados (GTS).

1.3 Sobre SMAC, Requerimientos, y Bloques Funcionales.

Los requerimientos que tiene SMAC para un microcontrolador, son: que éste tenga un módulo SPI, e IRQ de cualquier prioridad (las de teclado sirven), y 4 puertos de propósito general para comunicarse con el Radio. En teoría el SPI se puede reemplazar por 3 puertos de propósito general. En Figura 11. puede observarse cómo están compuestos los bloques funcionales del SMAC.

El SMAC + la capa de aplicación definida por usuario, se “quemar” en un microcontrolador, preferiblemente uno cuyos registros de SPI sean compatibles con aquellos en los encabezados de hardware del SMAC (teóricamente, se puede hacer *Porting* (puente) de la arquitectura de los procesadores para los que viene SMAC -HCs08GT60 y GB60- hacia cualquier otra, pero en la practica la labor consume mucho tiempo, así que se recomienda trabajar con estos dos a menos que sea absolutamente necesario cambiar).

Figura 11. Bloques funcionales del SMAC



Fuente: [FRE]

1.3.1 Primitivas del SMAC

SMAC tiene 19 primitivas, a partir de las cuales el desarrollador puede construir sus propias funciones de red, así como construir LAS FUNCIONALIDADES QUE HAGAN FALTA, Y QUE OFRECE EL MAC en IEEE 802.15.4., es decir, que en vez de

dejar sin uso algo ya implementado, donde se desperdiciaría peso en código, lo que se hace es implementar sólo la funcionalidad necesaria. En Tabla 6. se pueden observar las Primitivas de SMAC.

Tabla 6. Primitivas de SMAC

Nombre de la Primitiva	Función Prototipo / Retorno / Efecto
MCPSDataRequest	UINT8 MCPSDataRequest(tTxPacket *psTxPacket); / Retorna "SUCCESS" / Bloquea operación hasta que el mensaje se transmita.
MCPSDataIndication	Void MCPSDataIndication(tRxPacket *gsRxPacket); / Retorna Void / Avisar a la aplicación que se recibió un mensaje.
MLMEHibernateRequest	UINT8 MLMEHibernateRequest(void); / "SUCCESS" / Coloca al Radio en modo de hibernación, y apaga salida de CLK.
MLMEWakeRequest	UINT8 MLMEWakeRequest(void); / "ERROR" si no estaba en Hibernación o Doze, y "SUCCESS" si sí / Saca al Radio de Hibernación y Doze.
MLMSetChannelRequest	UINT8 MLMSetChannelRequest(UINT8 u8Channel); / "SUCCESS" si el # de canal es válido, "ERROR" si no lo es / Hace que el Radio transmita en la frecuencia que el correspondiente número de canal u8Channel.
MLMERXEnableRequest	UINT8 MLMERXEnableRequest(tRxPacket *psRxPacket, UINT32 u32Timeout); / "SUCCESS" si se pudo colocar al Radio en modo RX, "ERROR" si no / Coloca el radio en RX en la frecuencia dada, durante un tiempo UINT32 U32Timeout, se apaga cuando recibe un paquete, el cual envía a *psRxPacket.
MLMERXDisableRequest	UINT8 MLMERXDisableRequest(void); / "SUCCESS" / Saca al Radio del modo RX.
MLMSetMC13192ClockRate	UINT8 MLMSetMC13192ClockRate(UINT8 u8Freq); / "SUCCESS" / Coloca al CLK del radio en la frecuencia dada por u8Freq, cuyo rango va de 0-7.

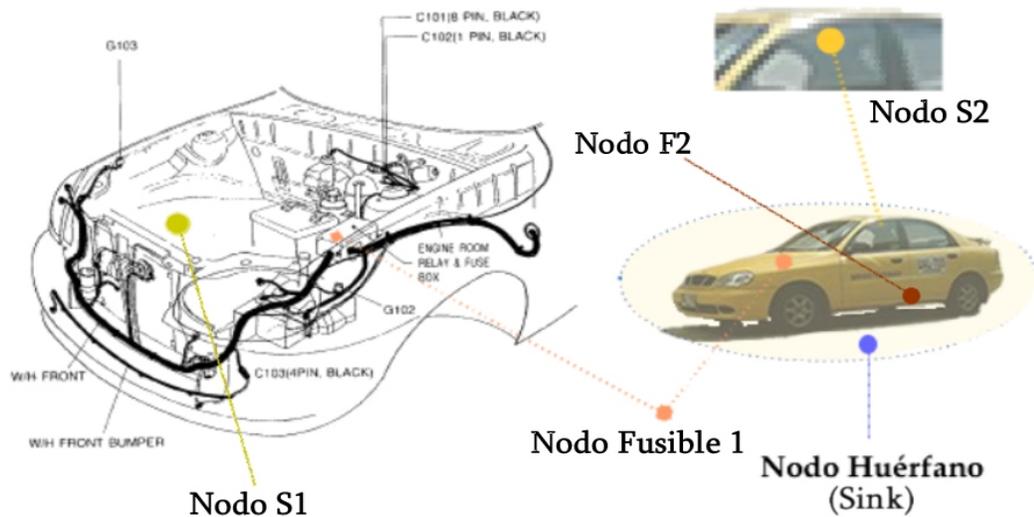
MLMEEnergyDetect	UINT8 MLMEEnergyDetect(void); / Un valor tipo UINT8 representando la energía en el canal actual / Llama un ciclo de Energy Detect - Clear Channel Assessment y retorna el valor de la energía (-Potencia/2).
MLMEMC13192SoftReset	UINT8 MLMEMC13192SoftReset(void); / "SUCCESS" / Hace Reset al radio.
MLMEMC13192XtalAdjust	UINT8 MLMEMC13192XtalAdjust(UINT8 u8ReqValue); / "SUCCESS" / Hace ajuste fino del oscilador por u8ReqValue.
MLMELinkQuality	UINT8 MLMELinkQuality(void); / Entrega un UINT8 con la calidad del enlace.
MLMSEtMC13192TmrPrescale	UINT8 MLMSEtMC13192TmrPrescale(UINT8 u8Freq); / Devuelve el valor del preescalado / Preescala la tasa a la que los Timers del Radio operan, dada por un número u8Freq que va de 0-7.
MLMEMC13192FEGainAdjust	UINT8 MLMEMC13192FEGainAdjust(UINT8 u8GainValue); / "SUCCESS" / Ayuda a calibrar las lecturas de detección de energía respecto a un u8GainValue.
MLMEDozeRequest	UINT8 MLMEDozeRequest(UINT32 u32Timeout); / "SUCCESS" / Lleva al radio a modo DOZE.
MLMEMC13192PAOutputAdjust	UINT8 MLMEMC13192PAOutputAdjust(UINT8 u8PaValue); / "OVERFLOW" cuando la función se llama con un valor mayor a 15 en u8PaValue, y "SUCCESS" cuando es normal / Ajusta la potencia de salida del TX en un valor u8PaValue.
MLMEGetRficVersion	UINT8 MLMEGetRficVersion(void); / Da un valor de 8 bits con la versión del Radio.
MLMETestMode	void MLMETestMode (tTxPacket *psPacket, UINT8 u8mode); / Retorna Void / Coloca al Radio en cualquiera de los modos de prueba (Ver 1-16 de [FRE]) para transmitir un paquete.
MLMEMC13192ResetIndication	void MLMEMC13192ResetIndication(void); / Void/ Avisas a la aplicación que se realizó un reset del Radio.

Fuente: [FRE]

2. Diseño

En este capítulo, se tratará: el rol de cada nodo en la Red (a continuación), la selección de Módulos RF, el diseño del hardware en las interfaces (sección 2.1), el diseño de los comportamientos de cada nodo y el software a partir de éstos comportamientos (sección 2.2), se presentará el patrón de radiación de las antenas en los módulos seleccionados (2.3) y se recopilarán los sistemas diseñados a través de diagramas funcionales de los mismos (2.4). Cada nodo tiene un papel en la Red, observar Figura 12.

Figura 12. Ilustración de la ubicación final de los nodos que conforman al sistema.



Obtenido con Macromedia Fireworks.

- El Nodo Sink visualiza al usuario la información recibida de los otros nodos, usando una pantalla LCD de dos renglones. También le ordena al nodo en la caja de fusibles el permitir/evitar la Ignición, tal que el carro solo arrancará de acuerdo a las ordenes de éste nodo.

- El Nodo Fusible (FUSIBLE1 en Figura 12) Controla Relays en la caja de Fusibles y Relays principal del carro, incluyendo a la línea que alimenta al Solenoide De Arranque, controlando así la Ignición del carro.

- El Nodo Acelerómetro (S2 en Figura 12) como su nombre lo dice, contiene un par de Acelerómetros, uno para los ejes X-Y, y otro para el eje Z. Este nodo se adapta a una gorra, y se supone que el conductor debe usarlo. Cuando los acelerómetros detectan un movimiento de la cabeza característico de una persona que está somnolenta, lo reportan al nodo Sink, tal que éste genere una respuesta ante las condiciones. Por ahora la respuesta consiste en enviar una señal al Nodo Relay para que active la Bocina del automóvil, y así ayudar al conductor a mantenerse alerta en el preciso momento en que pierde interés en la vía. Este comportamiento del nodo puede ser útil para prevenir

accidentes en escenarios donde el conductor, dura largos períodos manejando, tales como viajes por carretera.

- El Nodo de Temperatura del Motor (S1 en Figura 12) contiene un sensor de temperatura para el motor. El automóvil sobre el que se implementa este proyecto ya tiene un sensor de ésta temperatura, sin embargo sólo muestra "Caliente" y "Frío", pero no le da al conductor una información completa sobre la temperatura del motor, por ésta razón se adicionó este sensor.
- El Nodo de Temperatura Exterior (F2 en Figura 12) también tiene un sensor de temperatura para el ambiente. Puede ser especialmente útil en ambientes de frío extremo, para decidir en el caso de una emergencia si quedarse dentro del automóvil o no. Otros usos relativos al confort, pueden incluir el viaje por montañas o zonas donde donde la temperatura es cambiante, para saber la temperatura externa en algún momento y decidir si apagar el aire acondicionado y abrir los vidrios o no.

Se planearon estos roles para los nodos, pensando en que la implementación de la red sea lo menos invasiva posible respecto al automóvil, pues es sólo con fines demostrativos

(mostrar la funcionalidad de éste trabajo).

Los Indicadores de Cumplimiento o *Success Metrics* de éste diseño, se clasifican así:

- **Capacidad de Reaccionar en el Evento de una Falla de la Comunicación con uno o más Nodos:** A veces estas fallas de comunicación son esperadas, como cuando un usuario desea evitar el encendido del carro y se lleva o apaga el Nodo Sink; en este caso, los otros nodos ya saben que hacer. Pero a veces se presentan casos como que la batería de un nodo falle, o el nodo se dañe. La red debe entonces ser capaz de buscar al nodo sin afectar la comunicación con los otros nodos, y en algún punto, avisar al usuario cuál nodo ha sido declarado como perdido por la aplicación.
- **Alcanzar una Tolerancia Selectiva de Retrasos:** Algunas variables cambian rápido y puede llegar a ser crítica su llegada a algún nodo con el menor retraso posible, como las medidas del acelerómetro en caso de emergencia, o la respuesta del Nodo Fusible1 en el momento de un usuario querer encender su automóvil; otras variables pueden tolerar algún retraso (digamos no mayor a 10 o 20 segundos) como la temperatura externa, o la temperatura

del motor; esto porque la temperatura (en estas escalas, y a menos que haya un factor evidente -fuego, líquido congelante-) suele cambiar progresivamente. Por ésta razón, el diseño del protocolo y la aplicación debe contemplar la prioridad de recibir unos mensajes con menos respecto a otros, y estrategias en el comportamiento de este nodos críticos (Acelerómetro) de ser particularmente efectivo en hacer llegar la información al nodo Sink, y de éste último en hacer llegar al nodo Relay la orden de activar la bocina lo más prontamente posible.

2.1 Diseño y Selección de Interfaces Necesarias de Hardware

La metodología empleada para acondicionar el hardware en la implementación, consiste en primero seleccionar el tipo de Hardware sobre el que se hará la demostración de la red que se implementará.

Una vez definido esto, se debe definir la alimentación. A ésta parte se le dió atención especial, pues se descubrió que una batería de trabajo pesado no tarda más de 5 días en descargarse (ver Sección 3 para más detalles respecto a cómo se seleccionó la alimentación).

Posteriormente se deben adaptar, acorde con la función de cada nodo, los periféricos necesarios. En el caso del nodo Sink, por ejemplo, la adición de una pantalla LCD.

2.1.1 Selección de Capa Física

El hardware seleccionado para componer los radios que hacen posible la comunicación de los nodos de la red, consta de 2 tipos de módulos que cumplen con las especificaciones de Hardware de IEEE 802.15.4. De estos, dos tarjetas son del tipo SARD de Freescale, y tres del tipo PAN802154HAR00 de Panasonic, (Ver información de ambos Módulos en Anexo A1, y Sección 3 para más información sobre éstas tarjetas seleccionadas) en total 5 nodos.

Hoy en día hay muchas otras alternativas que se tenían a éste hardware, ya hay una segunda generación de tarjetas de desarrollo donde el Radio y el Uc se juntan en un solo SiP, aunque para el momento en que se comenzó el trabajo (la época de la primera generación de chipsets de Freescale), habían no más de 4 opciones factibles:

- Construir los Nodos a partir de un microcontrolador, y los radios de Freescale. Esta opción se intentó inicialmente, pero por inconvenientes logísticos con la empresa donde se iba a hacer la Soldadura de los elementos y la construcción de las tarjetas, no se pudo concretar. Ésta es la opción más económica, pues la compañía mencionada proveía la mano de obra y los equipos, además de que los chips para los radios fueron donados, y el único gasto sería no más de 30.000 pesos en materiales (incluyendo al microcontrolador).
- Nodos de Maxstream (\$10 - \$20 cada nodo): Tienen una plataforma física idéntica al Diseño de Referencia de Freescale para SMAC, sin embargo no permiten programación del Flash porque está protegida, y además no tienen disponible puerto de BDM, sino únicamente el puerto serial pero sin Embedded Bootload, la programación debe hacerse a través de lenguaje de lista de instrucciones, lo cual no permite trabajar con la capa de aplicación en el sistema que se busca y esto sólo basta para descartarlo; este tipo de sistemas es útil cuando se desea una especie de Wireless SCADA y se tiene una estación base conectada por puerto serial a un PC u otro dispositivo que envíe comandos.
- Tarjetas de Desarrollo 13192A0E (\$1499.00): Trae 5

tarjetas con LEDs, Switches, RS-232 y conector de 9V para las baterías, además de un Packet Sniffer. Es una opción excelente, sin embargo se obtuvo mejor relación costo-beneficio con los nodos seleccionados.

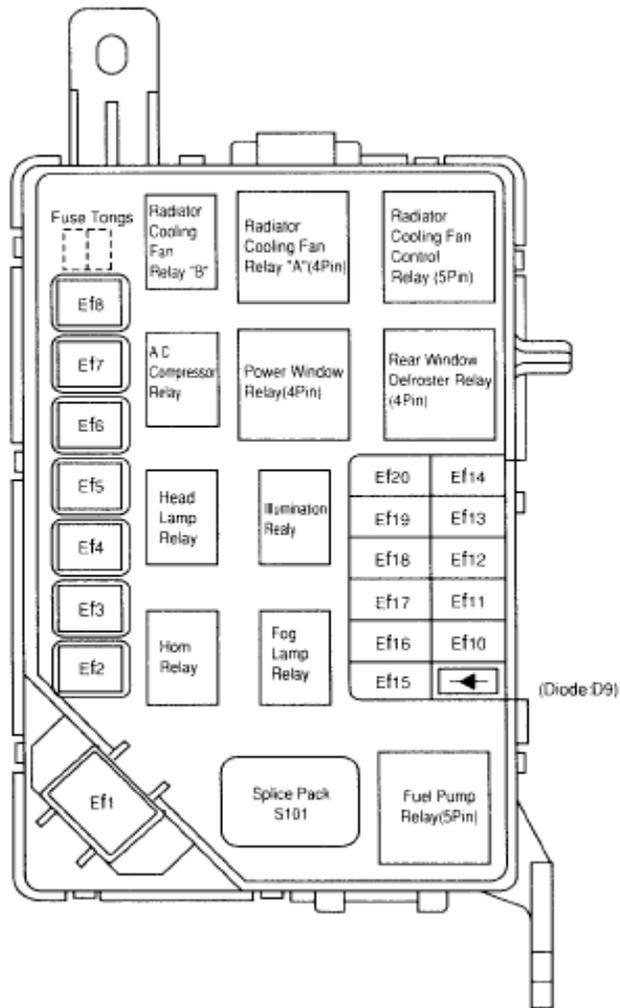
- Kit de Aprendizaje Estudiantil AP13192USLK ZigBee-ready RF Transceiver (\$116.5 cada nodo): solamente consiste en el Radio MC13192 con su antena, y una interfaz para conectarse a un Microcontrolador HCs08, HC12 o S12x, o Coldfire via SPI, así que implicaría adecuar el microcontrolador para conectarlo también, y aún así no se una relación costo-beneficio mejor que con los nodos seleccionados.

El factor más importante que influyó en la elección de éstos módulos, fué la *Funcionalidad*. *Funcionalidad*, pues SMAC trae librerías para correr directamente sobre los módulos SARD, y los cambios para correr sobre los módulos de Panasonic son mínimos, es decir cambiar unas pocas directivas #define en el mapeo de puertos, siendo además el Módulo Panasonic, de las opciones con mejor relación costo-beneficio en este tipo de módulos RF, con precios al por menor de entre 22 y 27 dólares.

2.1.2 Interfaces Nodo Interruptor de Encendido

Hay varias maneras de disponer un nodo interruptor en el encendido de un automóvil [BOS]. Es primordial saber donde están ubicados físicamente los puntos de interrupción. En Figura 13 se puede observar la Caja de Fusibles Principal.

Figura 13. Vista Caja principal de Fusibles Daewoo Lanos



Fuente: [DAE]

Y en Tabla 7 se puede observar a qué circuitos pertenece cada Fusible en la misma. Obsérvese que en Tabla 7 y Figura 28 que hay dos fusibles para el encendido (Ef2 y Ef3), ambos de 30A; para mayor detalle en sus efectos, observese con cuidado a Figura 14.

Tabla 7. Indicaciones de características en Fusibles de la Caja Principal, Daewoo Lanos. (Aquellos alimentados por 30 BAT+, se alimentan a su vez por el Main Fuse EF1. Para mayor información ver Figura 14).

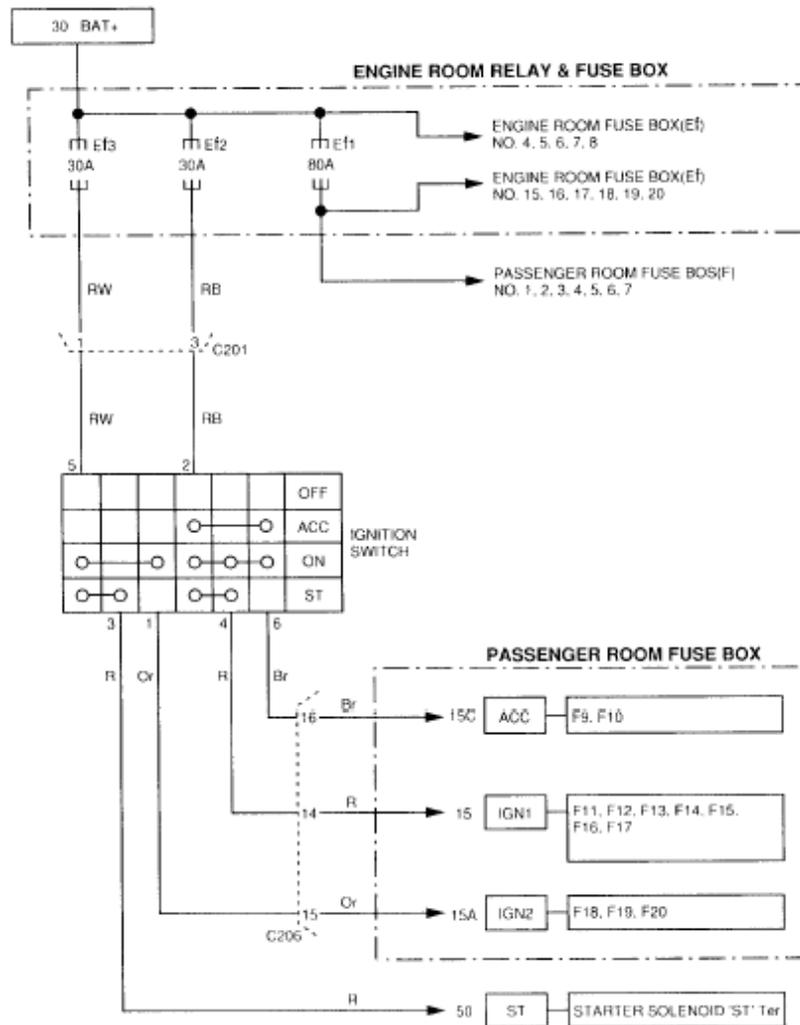
Fuente de Poder	Clasificación	Fusible #	Capacidad	Uso
30 Bat(+)	SB (Slow-Blown Fuse)	Ef1	80A	Fusible Principal
		Ef2	30A	Ignition S/W Power Supply (IGN1)
		Ef3	30A	Ignition S/W Power Supply (IGN2)
		Ef4	30A	Radiator Cooling Fan
		Ef5	30A	Power Window. Sun Roof
		Ef6	40A	EBCM
		Ef7	30A	Rear Window Defroster
		Ef8	30A	Blower Motor 4th Step
Diodo		D9	-	Compresor Aire Acondicionado
56a	Blade Type	Ef10	20A	Head Lamp High Beam (LH.RH)
56b		Ef11	10A	Head Lamp Low Beam (LH)
58L		Ef12	10A	Head Lamp Low Beam (RH)
30 Bat(+)		Ef13	10A	Parking Lamp (LH), Switch Illumination
		Ef14	10A	Parking Lamp (RH), License Plate Illumination
		Ef15	15A	Fog Lamp
		Ef16	15A	Fuel Pump
		Ef17	10A	Horn
		Ef18	10A	A/C Compressor Magnetic Clutch
		Ef19	25A	Head Lamp Relay '30', Passing Switch
		Ef20	25A	Illumination Relay '30', Terminal

Fuente: [DAE]

La primera interrogante es, ¿qué línea se debe interrumpir, ante la presencia de dos fusibles protegiendo el encendido de éste automóvil?. Puede llegar a responderse, sabiendo que el

encendido de éste automóvil se enciende por etapas, Preignición e Ignición.

Figura 14. Relación de Ef2 y Ef3 con el encendido

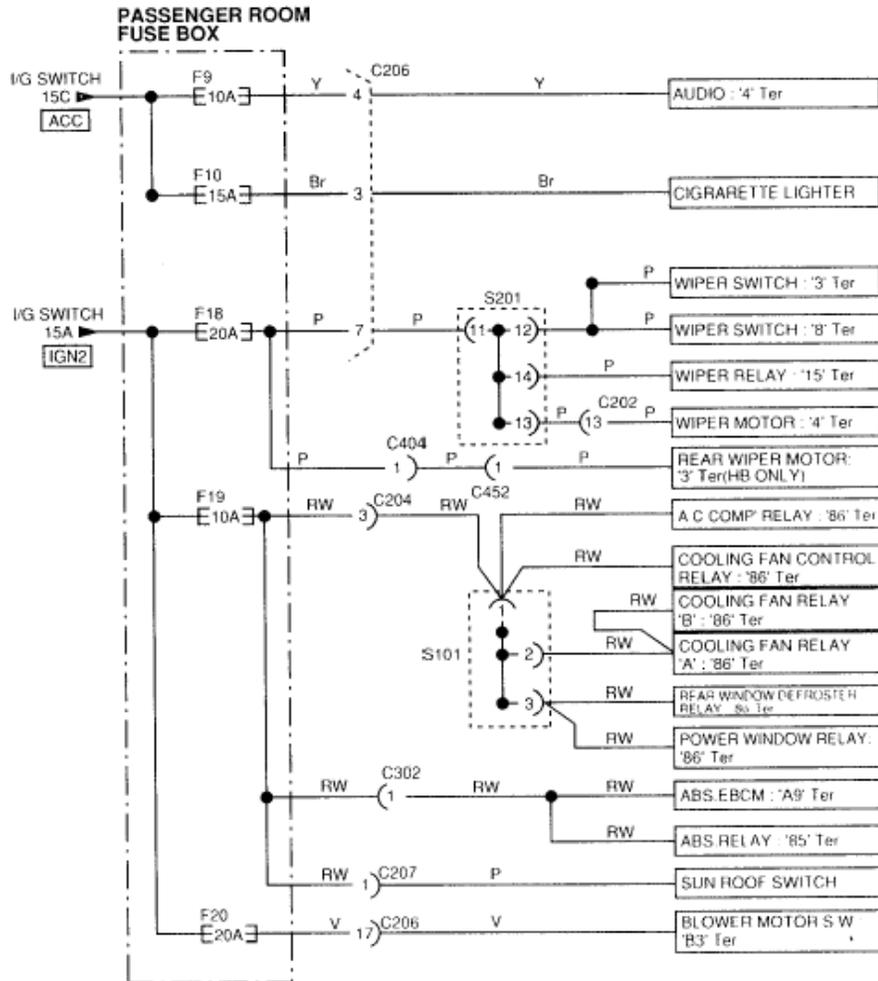


Fuente: [DAE]

Observando con más detalle a Figura 15, se evidencia que por Ef2 (fusible) pasa la energía que alimenta la Caja de Fusibles y Relays del Habitáculo. En ésta caja se encuentran

el Interruptor de Ignición 1 (IGN1, del que se hablará) y el Interruptor ACC. El último, (ver Figura 15) alimenta encendedor de cigarrillos y audio.

Figura 15. Diagrama de Caja de Fusibles del Habitáculo



Fuente: [DAE]

Al comparar Figura 15 con Figura 14, se observa que la línea

que pasa por fusible Ef3 alimenta al Interruptor de Ignición 2 (IGN2) y al Solenoide de arranque.

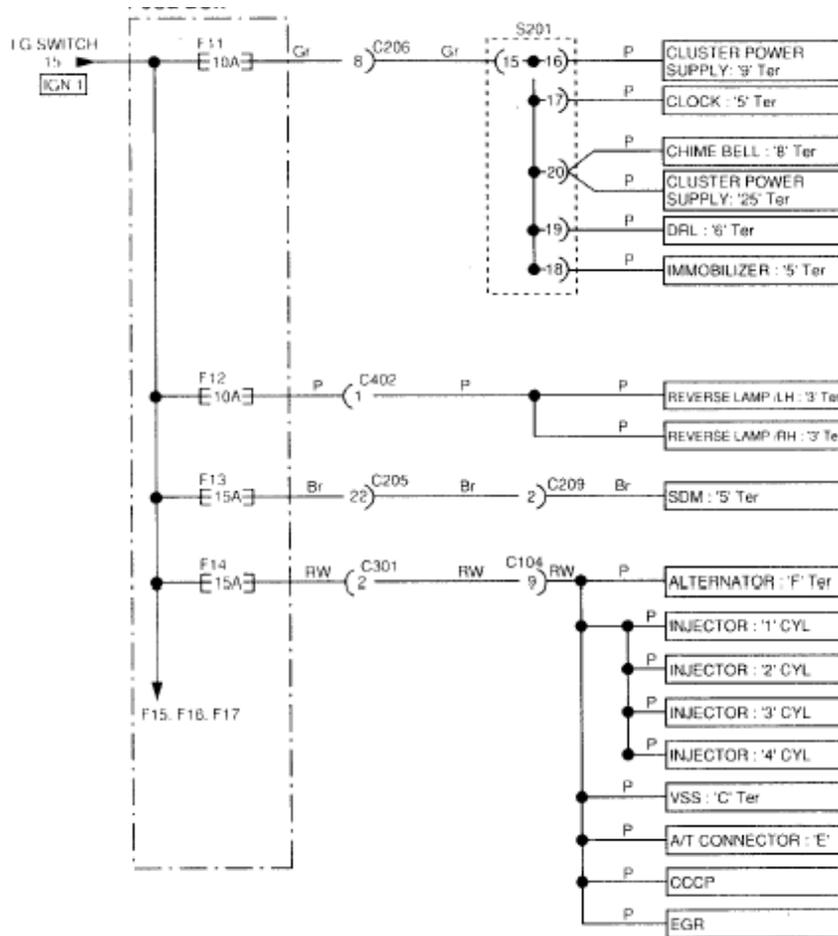
En cuanto a IGN1, éste controla que pase energía a través de los fusibles f14 (de 15A), para inyectores y el alternador, y f17 (de 15A también) por donde circula la energía del relé de bombeo de gasolina.

Durante el encendido, cuando se está girando la llave y ésta para en la primera ranura, los sistemas del automóvil que dependen del Switch ACC (Ver Figura 14) quedan energizados, sin embargo todavía no se ha encendido la bomba de gasolina (Preignición) ni se ha energizado al Solenoide de Arranque (Ignición).

Si se continúa girando, para cuando la llave encaje en la segunda ranura, se energizan los sistemas que dependen del Switch IGN1 -Ver Figuras 16 y 17- y del Switch IGN2 -Ver Figura 15-, y ésta es la Preignición.

Finalmente, cuando la llave se vuelve a girar hasta escuchar el sonido de Ignición, se activa el Switch que controla el Solenoide de Encendido de éste automóvil.

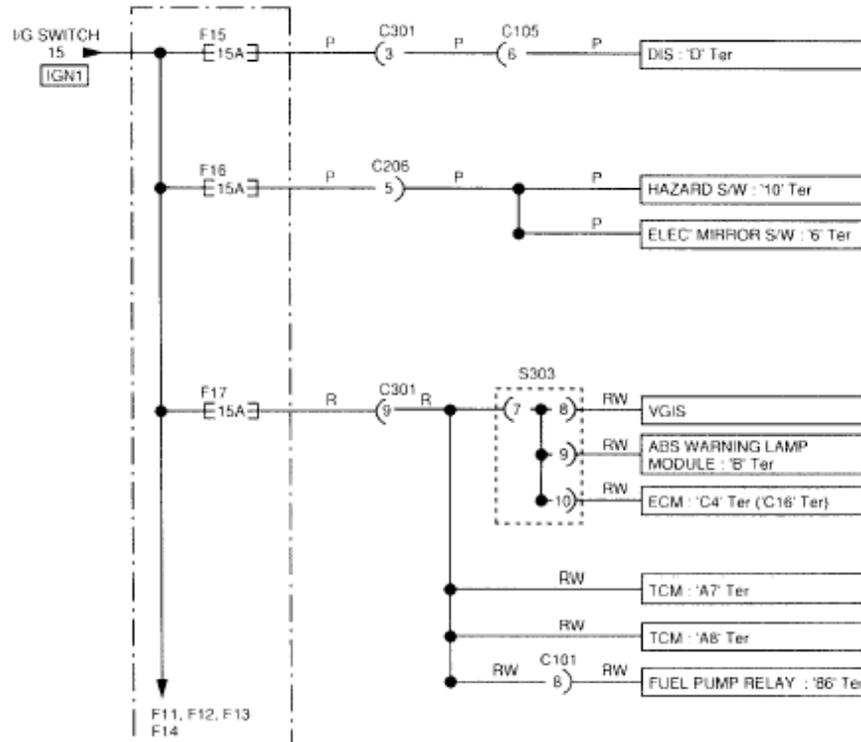
Figura 16. Sistemas que activa el Interruptor de Encendido 1 (IGN1)



Fuente: [DAE]

Si se desea evitar que el automóvil no tenga ignición, cualquiera de las dos líneas que se interrumpen (Ef2 o Ef3) pueden hacer el trabajo: El automóvil no arrancará si la bomba de gasolina se desenergiza, y tampoco si el solenoide de arranque se desactiva. Otra opción podría ser interrumpir ambas líneas, pero con una sólo basta para cumplir el objetivo.

Figura 17. Continúa con los Sistemas que activa el IGN1



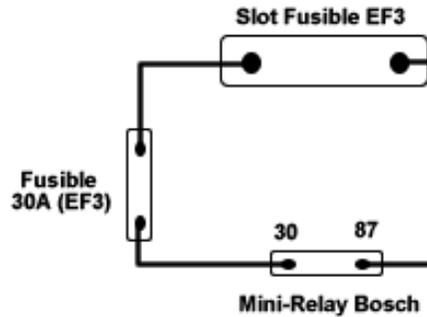
Fuente: [DAE]

Esta última opción podría disminuir la comodidad del usuario para casos muy cotidianos como dejar personas de confianza escuchando el radio. Si se interrumpe sólo la línea que sale de fusible Ef3, esto puede ser posible.

2.1.2.1 Diseño del Circuito Interruptor de Línea de Encendido

La acción de interrumpir la línea del fusible Ef3, lo hará un sistema ilustrado en Figura 18. Básicamente, el trabajo es

Figura 19. Intervención del Relay en la Línea de encendido.



Obtenido con: Macromedia Studio.

Si el switch "Manual Override" está en la posición del VCC del nodo, el automóvil tendrá operación normal, pues se permitirá el paso de la corriente entre las terminales 30 y 87 del Relay, indiferente del estado del Pin en el microcontrolador que debe controlar el relay. Sin embargo, si se coloca en la posición UcPin, la Ignición estará en función de la salida de éste pin. Cuando la salida sea cero, el Automóvil no podrá encender. Cuando sea uno, la Ignición podrá darse. El sistema se comporta acorde con Tabla 8.

Tabla 8. Tabla para el comportamiento del sistema que controla la interrupción de la Línea en Fusible Ef3

Manual Override Switch	UcOut	Terminal 87A (NC)	Terminal 87 (NA)	Automóvil puede encender?
UcVcc	X	HI-Z	Conduce	Operación Normal
UcPin	0	Conduce	HI-Z	NO
UcPin	1	HI-Z	Conduce	Operación Normal

Otro detalle importante que se observa es la presencia de dos fuentes en el circuito después del optoacoplador; ésto se hizo pues se consideró conveniente no exponer la alimentación de los nodos a la misma tierra que la batería del carro, pues esto podría añadirle ruido al funcionamiento del microcontrolador y del radio en el nodo; se coloca una alimentación aparte únicamente para disparar al transistor. Cada vez que se dispare, ésta alimentación entregará una corriente dada por EQ4:

$$\text{EQ4: } I_d [A] = \frac{(V_{bat} - 0.7)}{100} \left[\frac{V}{\text{Ohms}} \right]$$

Que estaría entre $I_d=24\text{mA}$ e $I_d=15\text{mA}$, para un V_{bat} entre 3.1V y 2.2V, dependiendo del estado en que estén las baterías.

En cuanto a la selección de componentes, primero se tiene que el contacto del relay debe soportar aproximadamente la misma corriente que el fusible de la línea que va a interrumpir, y el voltaje de la fuente que lo alimentará. El relay se alimentará con energía de la batería del automovil, en su terminal 86.

Para ésto, se seleccionó un Mini Relay a 12V/30A marca Bosch referencia 0 332 209 150, cuyas características se pueden

consultar en Anexo A3.

El optoacoplador seleccionada fué la 4N35 de Fairchild Semiconductors. Éstas se disparan cuando tienen un voltaje superior a 1.18V en las terminales de entrada, y además se hace circular una corriente "I" que esté en el rango de EQ5:

$$\text{EQ5: } 5\text{mA} \leq I < 60\text{mA}$$

por entre éstas, y así trabajar en un rango seguro para la optocupla. Dado que la salida del microcontrolador provee hasta 25mA en un pin de propósito general, y que el voltaje que entrega este pin en el peor de los casos es de (Vdd-0.5) (ver [DAT], pág 259 y 262), se gradúa un valor de resistencia entre el Pin y el Optoacoplador, tal que se cumpla la condición de EQ6:

$$\text{EQ6: } 5\text{mA} \leq I < 25\text{mA}$$

Y así trabajar en un rango seguro tanto para el Optoacoplador, como para el Uc.

Con ésto, se introduce la siguiente ecuación en una tabla de excel, y se iteran valores comerciales bajos de resistencias, para obtener un rango de posibles corrientes en las terminales de entrada del optoacoplador dado por EQ7:

$$\text{EQ7: } \frac{(V_{pin}-1.18)}{R}=I_{oc}$$

Donde V_{pin} puede tener por valor [DAT] V_{dd} (en el mejor de los casos) y $V_{dd}-0.5$ (en el peor de los casos), I_{oc} es la corriente que circula por la entrada del Optoacoplador.

El caso en que se daría la corriente más alta, sería cuando $V_{pin}=V_{dd}=3.4V$ (mayor voltaje de alimentación recomendado para trabajar con los Nodos Panasonic, Ver Anexo A1).

El valor de resistencia con el que da la corriente más alta dentro del rango seguro, fué 100 Ohms, según EQ8:

$$\text{EQ8: } I_{oc}=\frac{(V_{pin}-1.18)}{R}=\frac{(3.4-1.18)}{100}=22.2\text{mA}$$

Ahora, para el peor de los casos, donde el $V_{pin}=V_{dd}-0.5$ y V_{dd} sea 2.2V, se tendría a EQ9:

$$\text{EQ9: } I_{oc}=\frac{(V_{pin}-1.18)}{R}=\frac{(2.2-0.5-1.18)}{100}=5.2\text{mA}$$

Y con ésto, se tiene que usando una resistencia de 100 Ohms, se tendría una corriente segura para operar, estando la batería que alimenta al nodo de Panasonic entre 3.4v y 2.2V.

El colector en la salida del optoscoplador no soporta los 140mA que necesita el Relay para dispararse. Por este motivo, se conectará a la base de un transistor TIP41C para aplicaciones de conmutación, que soporta mucho más que ésta corriente de colector (ver Datasheet en Anexo A6), tal que si se presentara un corto en las terminales de la bobina, el colector del transistor pudiese soportar la corriente que se dirigiese hacia ésta terminal (Ver Figura 20).

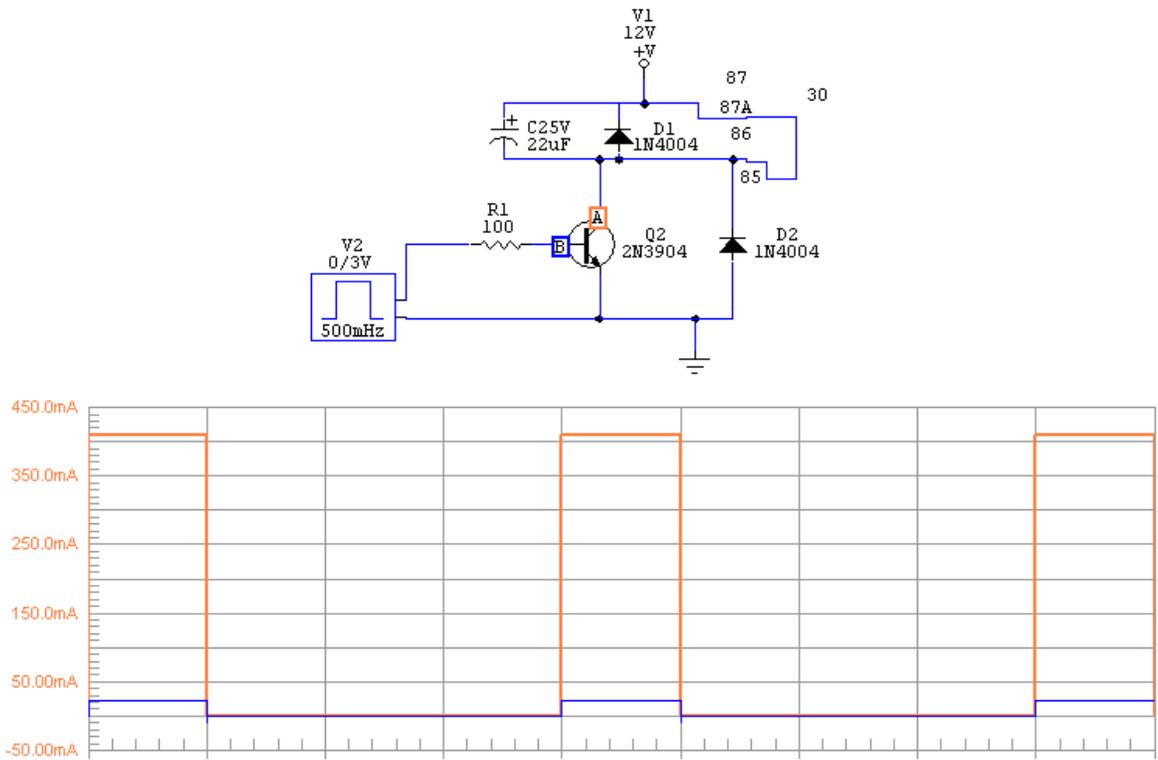
Para asegurar un disparo correcto del relay (evitar que el voltaje de disparo oscile y pueda causar inestabilidad en el sistema o daños sobre el relay), están:

- * Un capacitor de 22uF para filtrar la señal que sale del transistor sobre la entrada del relay (éste va en paralelo con las terminales 85 y 86).

- * Diodos a través de donde la bobina del relay y el capacitor puedan descargarse:

- El primer diodo se ubicará en paralelo con las terminales de entrada, con dirección de la terminal 85 a la 86.
- El segundo diodo estará ubicado desde la tierra hacia la terminal 85 del relay.

Figura 20. Simulación de un corto circuito entre las terminales 86 y 85 del relay.



Obtenida con: Circuit Maker 2000.

Es útil que los diodos esten sobredimensionados al voltaje nominal de sus terminales para tener un margen holgado de operación en caso de que el capacitor falle. En cuanto a la corriente que fluye por los diodos, se espera que en condiciones normales sea despreciable, comparada con la que pasa por el colector del transistor, así que no hay exigencias al respecto, estaría bien un valor mayor o cercano al de la corriente de colector (140mA).

Así que cualquier diodo de la familia 1N400X sería útil para

ésta aplicación. En Anexo A4, se puede consultar el Datasheet del Optoacoplador 4N35 y de los Diodos 1N4004.

2.1.2.2 Diseño del Circuito de Control del Micro-Relay de la Bocina

El Micro-Relay que controla la activación de la Bocina, es de Marca Daewoo, referencia 90 22 9206, trabaja a 12V 16A y es Normalmente Abierto (NA). En Figura 21, se pueden observar (derecha) un isométrico del Micro-Relay, y en la izquierda las terminales del mismo. Las terminales en la parte inferior son de disparo. La terminal más positiva es la (86).

Figura 21. Isométrico del Micro-Relay de la Bocina (Derecha) y diagrama de las terminales del mismo (Izquierda).



Fuente: [DAE]

El circuito para disparar al Micro-Relay de la Bocina y al Mini-Relay del encendido es el mismo, pues éstos dos solo difieren, desde el punto de vista del disparo, en las

corrientes que demanda cada uno: el Mini-Relay demanda aprox 140mA, y el Micro-Relay aprox 150mA, y esta diferencia no afecta al Diseño del circuito. Ahora, es necesario que éste relay se active no sólo cuando la tarjeta lo demande, sinó conservar la funcionalidad anterior. Para ésto, se conectará el circuito de disparo en paralelo con las terminales ya existentes de la bocina tradicional.

2.1.3 Interfaces Nodo Sink

El nodo Sink va a estar basado en una tarjeta SARD de Freescale. Al tener éstas tarjetas ya construida su interfaz de alimentación, es más funcional emplearla que construirla, así que se alimentará con una batería de 9v. Aparte de ésto, para comunicarse con el exterior, estas tarjetas disponen de 4 pulsadores y 4 Leds. Sin embargo, dado que es necesario mostrar mensajes de aplicación, se empleó una interfaz LCD.

2.1.3.1 Interfaz para Display LCD

La interfaz con el Display LCD consta de dos partes. La interfaz de Hardware, que se hizo conectando un cable Ribbon

de 10 líneas (de donde 1 queda libre) con las líneas requeridas para Datos (4), Control (3) y Alimentación (2).

El pin del contraste está conectado a un potenciómetro y se ajustó al máximo; la alimentación del display se obtiene por una salida regulada de 3V que tiene la tarjeta SARD. El display se instalará en un ángulo tal que el ojo del observador pueda percibir la formación de caracteres en el Display, y éste estará fijo al lugar reservado para la presencia del Nodo en el carro. Los puertos usados en la interfaz, se muestran en Tabla 9:

Tabla 9. Puertos del Uc, ubicación en la Línea de Jumpers principal de las SARD, y sus funciones en la interfaz LCD.

PUERTO EN EL Uc	UBICACION	FUNCIÓN
PTB0-3	(J1, J3, J5, J7)	DATALINE 0-4
PTB6	(J9)	E (Enable Line)
PTB7	(J11)	Rs (0 = Instruction, 1 = Data Input)
PTG1	(J25)	R/W (0 = Write to LCD, 1 = Read From LCD)

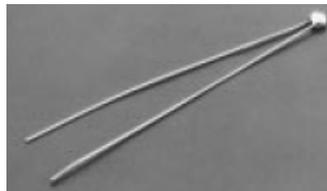
En cuanto al código fuente que tiene las funciones propias de La Tarjeta LCD empleada es la misma del proyecto "Prototipado de Sistemas Digitales", Universidad Tecnológica de Bolívar.

2.1.4 Interfaces con los Sensores en Nodos S1 y F2.

2.1.4.1 Sensor para Nodo S1

El Nodo S1 estará ubicado en cercanías del motor, captando la temperatura del agua que refrigera al motor. La temperatura de *funcionamiento* normal del motor que se transmite al agua, suele estar entre los 75°C y los 90°C. El elemento sensor de temperatura, es un termistor NTC de referencia RL2007-1723-103-SA de General Electric, que tiene un rango de operación entre -50°C y 150°C, alcanza 3K Ohms a 25°C, tiene una precisión de +/-1°C entre 0 y 120°C, y un coeficiente de disipación de 2.5mW/°C. Ver su apariencia en Figura 22.

Figura 22. Imagen del Termistor RL2007-1723-103-SA



Fuente: [Anexo A4]

Para las dimensiones físicas, ver Anexo A4: datasheet de RL2007-1723-103-SA. La curva de Resistencia Vs Temperatura para un termistor NTC, suele estar determinada por la

Ecuación de Steinhart-Hart* ; su forma exponencial que en términos de resistencia es EQ10⁺:

EQ10:

$$R = e^{\left[\left(-\frac{\chi}{2} + \left(\frac{\chi^2}{4} + \frac{\psi^3}{27} \right)^{1/2} \right)^{1/3} + \left(-\frac{\chi}{2} - \left(\frac{\chi^2}{4} + \frac{\psi^3}{27} \right)^{1/2} \right)^{1/3} \right]}$$

Donde R es Resistencia (Ohms), T Temperatura (en Kelvins) y a, b, c son constantes del material semiconductor.

$$\chi = \frac{a-1/T}{c} \quad \psi = \frac{b}{c}$$

Simplificando la ecuación EQ10 para rangos más pequeños, (25°C hasta 90°C) ésta queda de la forma EQ11⁺:

$$\text{EQ11: } R(T) = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

Donde T0 es el valor de Referencia para un valor R0 de resistencia, y B encierra las constantes a, b y c.

El valor de B que proporciona el Fabricante de éste elemento en el datasheet es de 4073 °Kelvin, y se sabe que a los 25°C (298.15°Kelvin) se tienen 3KOhms; la ecuación queda de la forma EQ12:

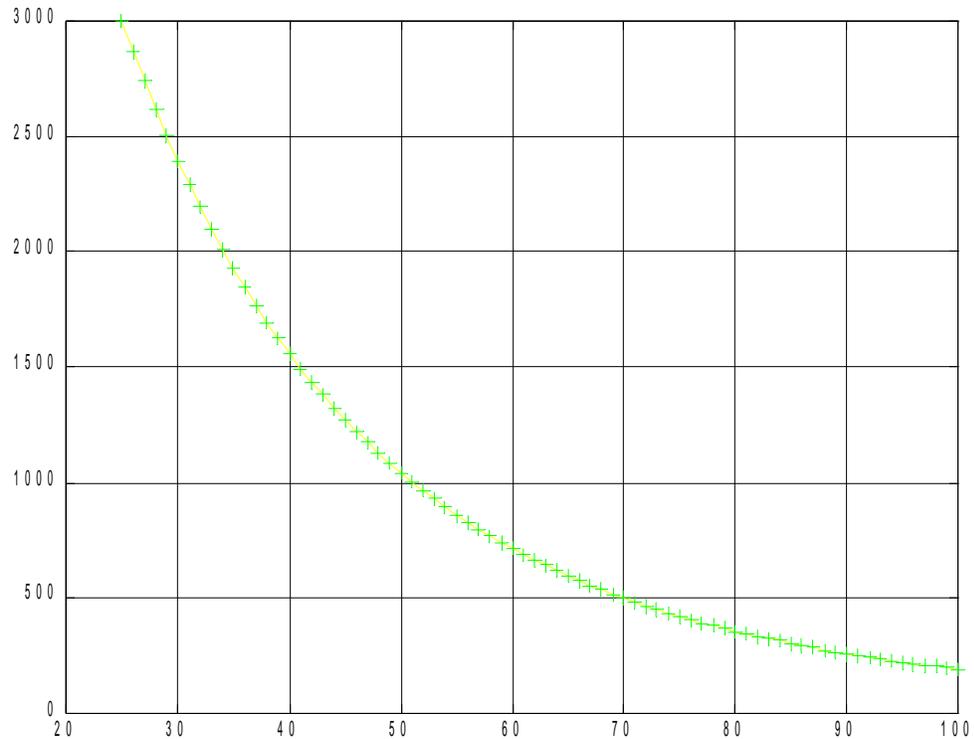
$$\text{EQ12: } R(T) = 3000 e^{4073 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298.15} \right)}$$

A partir de ésta, se puede aproximar un valor de resistencia para el termistor a los 90°C (363.15°Kelvin, ver Figura 23).

* <http://www.answers.com/topic/steinhart-hart-equation>

+ http://www.atpsensor.com/ntc/steinhart/steinhart.html?=&steinhart_main.html

Figura 23. Curva característica para el termistor empleado, según datos del fabricante y la ecuación de Steinhart-Hart



Obtenida con: MatLab 5.3.

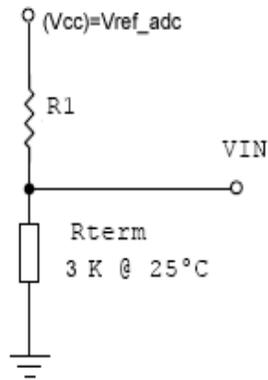
Lo importante en este nodo es sensor si se alcanza una temperatura cercana a los 90°C, y avisar al conductor de esto, y el resto del tiempo simplemente sensor valores de temperatura. Por esto, se hará el circuito en Figura 24.

Vin en Figura 24 está conectada al convertidor Análogo Digital. Se espera que el valor de Vin, en temperaturas normales de funcionamiento sea mayor a VCC/2.

Sólo cuando R1 y Rterm sean idénticas, Vin alcanzará este0

valor, y cuando R_{term} sea menor a R_1 , estará por debajo de $V_{CC}/2$.

Figura 24. Interfaz con Termistor para Microcontrolador.



Fuente: Circuit Maker 2000

Para seleccionar el valor de R_1 , se buscará un valor comercial que esté en la vecindad de la resistencia del Termistor a los 90°C .

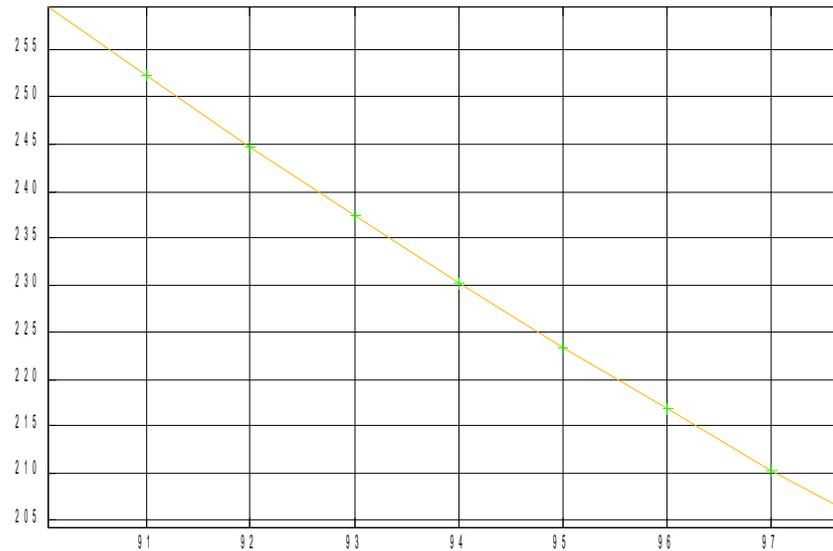
Para ésto, ver Figura 25 que a los 90°C se alcanzan 260 Ohms, y a los 95°C se alcanzan aproximadamente 223 Ohms. Esto deja dos valores comerciales cercanos: 270 Ohms y 220 Ohms.

Se selecciona aquella de 220 Ohms, donde se alcanzarían voltajes idénticos entre ésta y el termistor a los 95°C .

Para el código fuente de la lectura de éste sensor, la

secuencia de instrucciones es similar a la del acelerómetro, pero con otros valores a discriminar. Éste código fuente puede encontrarse en Anexo C1.

Figura 25. Acercamiento en la vecindad de 90°C del valor de resistencia del termistor, acorde con Figura 24.



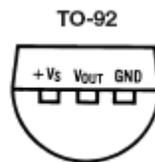
Obtenida con: MatLab 5.3.

2.1.4.2 Sensor para Nodo S2

La función del Nodo S2 es sensar temperatura ambiente en el exterior del automóvil. Este rango de trabajo se tomará entre 0°C y 50°C.

El elemento sensor, es el circuito Integrado LM61 (Ver Figura 26). Éste es capaz de sensar entre -30°C y 100°C , alimentandose con entre 2.7V y 10V. El voltaje de salida de éste elemento es linealmente proporcional a la temperatura en grados Celcius, a una razón de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, teniendo una base de 600mV a los 0°C y 850mV a los 25°C . Está calibrado para exactitudes de $\pm 2.0^{\circ}\text{C}$ en la temperatura de trabajo especificada.

Figura 26. Diagrama empaquetado TO-92, para integrado LM61.



Fuente: [Anexo A4]

En cuanto al circuito para la Interfaz, +Vs se conecta con el voltaje de referencia del conversor A/D, y GND con la tierra del Microcontrolador. Vout (que máximo alcanza 1.6V), se conecta junto con la entrada del conversor análogo digital, en un extremo de una resistencia de 180 Ohms, y el otro extremo de la resistencia al Pin Ground; así se asegura una corriente menor a 5mA en ésta resistencia. Para el código fuente, las operaciones son similares a Nodo ACC y a Nodo TEMP1. Ver Anexo C1 para más detalles.

2.2 Diseño del Software

Al comienzo de la sección anterior, se hicieron una serie de pruebas de descarga de baterías con distintos modelos de entrega de datos. Para diseñar el protocolo de la red, (para cada nodo hay un comportamiento diferente dentro del protocolo que se construirá pues cada uno asume una función), los siguientes *tradeoffs* entre características del **Grupo C** fueron los más críticos:

1. Un *tradeoff* entre la funcionalidad de la aplicación, y la longevidad del sistema.
2. Un *tradeoff* entre latencias y tolerancia a las fallas.

En cuanto a los otros factores, la escalabilidad no presenta problemas, dado que si se desea añadir otro nodo al sistema, es con describir el comportamiento del mismo en el Nodo Sink, y programar el mismo de nuevo, bastará.

Es muy importante seguir las directrices en [FR2] pues algunas tareas (ej. *asignación de datos en arreglos cortos*) se pueden hacer más eficientes simplemente escribiendo los programas acorde con las directrices mencionadas.

Ahora, determinar cuál modelo de entrega de datos se ajusta más al observador para diseñar el Protocolo de Red (las funciones de comunicación que se construyen dependiendo del comportamiento designado en los diagramas de flujo a continuación en 2.2.1, a partir de las primitivas de red en la sección 2.2.3) y la Aplicación (interfaces con el usuario como mensajes por el LCD o los LED, la manera de dotar al usuario de oportunidades de solicitud de datos a través de pulsadores, etc), es cuestión de seguir los siguientes pasos:

- Observar la situación planteada atentamente, e idear unos comportamientos para cada agente (Nodo).
- Construir unos diagramas de Flujo a partir de estos comportamientos para solucionar el problema.
- Programar éstos diagramas de Flujo en el Lenguaje necesario para ejecutarlos (en este caso, C).

En la Sección 2.1.2.1 y 2.1.2.2, se hicieron una serie de pruebas de duración de baterías con distintos tipos de baterías (CR2032, AAA, C), en varios escenarios: en el escenario del peor caso, para seleccionar la alimentación adecuada.

También en escenarios que simulan modelos de entrega de datos sin ahorro de energía, para observar de qué manera se comportaba el voltaje de la batería entre unos y otros, y finalmente, pruebas en escenarios de modelos de entrega de datos con ahorro de energía, para observar si efectivamente el voltaje caía con más lentitud en la batería.

De todas éstas pruebas, se determinó por funcionalidad y ahorro de energía, que el Modelo de Entrega de Datos para esta aplicación, sea un Híbrido entre el de "entrega por solicitud de observador", y el de "entrega por eventos en variable".

De esta forma, los nodos rodeando al Sink no envían datos a menos que éstos sean solicitados por el mismo Sink, excepto en casos de emergencia por los Nodos S2 (acelerómetro) y F2 (temperatura del motor), siendo éstos comportamientos explicados con más cuidado en la siguiente sección: "Diagramas de Flujo para cada Nodo".

Para determinar los intervalos de dormir y despertar de los radios en los nodos, se tuvieron en cuenta tres factores:

- Que el tiempo de espera del usuario por una respuesta de

parte del sistema, permite ser extendido a pocos segundos excepto en las condiciones de emergencia mencionadas en el párrafo anterior.

- Que en estos tiempos de espera se manejen tal que la prioridad en el ahorro de energía la tengan los nodos distintos al Sink.
- Que el enlace entre el Nodo Sink y los otros nodos sea la mejor posible, viendose ésto reflejado en el Número de Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas, y en los Tiempos de respuesta máximos, mínimos y promedio, de Solicitudes de observador atendidas. (Ver Sección "Resultados y Observaciones").

2.2.1 Diagramas de Flujo para cada Nodo

A continuación, se describen a través de un diagrama de flujo, las operaciones que llevará a cabo los Nodos. Para consultar el código fuente de cada nodo, ver Anexo B. En Figura 27 se aprecia el Comportamiento del Nodo Sink. El comportamiento del Nodo Sink, se divide en dos ciclos.

Figura 27. Diagrama de Flujo simplificado, comportamiento Nodo Sink.



Obtenida con: Macromedia Fireworks.

Uno, en el que se reporta ante los demás nodos, y pide reportes de los mismos para saber si están presentes en la red, conocido como *Query Global a Todos los nodos*. Éste consiste en comunicarse con todos los nodos de manera secuencial, a través de un comando de solicitud de datos; los datos son entregados a manera de acuse de recibo, tal que todos los nodos discriminen si el Sink está presente, y para que el mismo Sink discrimine con qué nodos cuenta la red. Aquí se filtra la validez de todo mensaje recibido a través

de su dirección MAC (64 bits) de origen.

Y otro, en que el Nodo está a la expectativa tanto de órdenes por parte del observador, como de información emergente por parte de los nodos S2 y F2, durante un tiempo contado por el "Timer". En ambos estados, muestra la información de los procesos que está realizando en el Display LCD.

El TIMER, es una variable que se establece dependiendo directamente de la ventana de tiempo permitida al relay del encendido del automóvil para permanecer en un estado (normal, o no permitir encendido).

El Timeout del Envío es la suma del tiempo que dura un nodo enviando información y esperando acuse de recibo. "Max Timeout #" es el número de solicitudes que pueden intentarse antes de declarar como fallido el intento de comunicación.

En la Figura 28, se puede observar el diagrama de flujo que representa el comportamiento del nodo F2 (acelerómetro). El valor de R1 es el tiempo que dura encendido el radio mientras recibe. Este valor se estableció anteriormente de poco menos de 7ms.

Figura 28. Diagrama de Flujo simplificado, comportamiento Nodo F2 (acelerómetro)



Obtenida con: Macromedia Fireworks.

Cuando el estado de las variables en Nodo S2 y F2 sea normal, durarán aproximadamente 1.2 segundos con su Radio dormido, ahorrando energía, encendiéndose por menos de 7ms para verificar si el Nodo Sink les ha solicitado Datos, y en caso de que sea así, los envían. De este modo, para estos dos nodos, se tiene un ciclo de trabajo del 0.58% (suponiendo que se tenga el acuse de recibo) en su Radio, ahorrando energía.

En cuanto a los valores dentro del rango normal que se leen

de X, Y y Z en los acelerómetros, se aprecian en Tabla 10.

Tabla 10. Rangos que lee el Conversor A/D en la tarjeta SARD, con los valores de los Acelerómetros en X-Y y Z.

Eje	Valores en Rangos Normales (sin mayor inclinación)	Condiciones
X	(atrás) 76 - 124 (adelante)	Leer ADC_Acelerómetro Eje Z; Si el valor está entre 150 & 180 driver_state= AWAKE;
Y	(der) 76 - 135 (izq)	Leer ADC_Acelerómetro Eje X; Si el valor está entre 76 y 124 { Leer ADC_Acelerómetro Eje Y; Si el valor está entre 76 y 135 driver_state= AWAKE; Si no, driver_state= SLEEP;
Z	(up) 150 - 180 (dwn)	}Si no, driver_state= SLEEP;

Los valores del sensor que el microcontrolador lee del conversor A/D, están entre 0 y 255. No fue necesario construir una interfaz de hardware para esto, pues ya venían en la tarjeta SARD.

La diferencia (a nivel de Diagrama de Flujo) entre los Nodos S2 y F2, es la manera como se asignan los valores de la Variable *user*, y la variable sobre la que se hace la comparación inicial en el nodo F2. La comparación inicial, se hace sobre el valor del voltaje del sensor de temperatura y la variable *user* es un vector de dos posiciones.

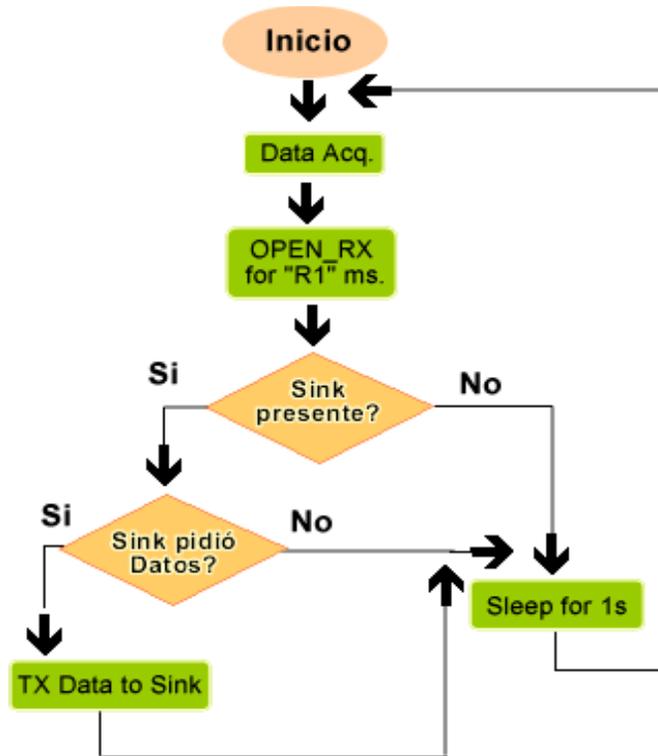
Si la temperatura medida está fuera del rango seguro de operación del Motor, la salida es *-NO-*, y el valor de la posición uno (1) de *user* es *-DANGER-*, y de la posición cero (0) es el valor de la temperatura, y se envía la variable *user* completa al nodo Sink.

Si está dentro del rango seguro de operación, la salida es de la primera comparación es *-SI-*, la posición uno (1) de *user* es *-SAFE-*, y la posición cero (0) sigue siendo el valor de la temperatura, pero sólo se envía al nodo Sink la posición cero para ahorrar energía evitando enviar información que se puede obviar.

Finalmente, el comportamiento de los nodos S1 y Fusible1 es similar: cada segundo encienden su receptor para verificar la presencia del nodo Sink; el nodo Sink envía comandos acorde con lo necesario.

En Figura 29 puede observarse un diagrama de Flujo con éste comportamiento.

Figura 29. Diagrama de Flujo, comportamiento simplificado de Nodos F1 y S1.



Obtenido con: Macromedia Fireworks.

La diferencia, radica en la reacción de cada nodo a los comandos recibidos, y en el número de comandos, pues el nodo S1 simplemente recibe un *QUERY* de su temperatura, a lo que responde enviando la información, mientras que para el nodo Fusible1, el solo acuse de recibo de la presencia del coordinador es implícitamente un comando, con el cual el nodo Fusible1 permite que el automóvil se encienda; si además recibe un comando explícito como *-HONK-* para activar la bocina, éste activa el relay de la misma.

2.2.2 Descripción funcional del código fuente de SMAC

En esta sección, se hace una expansión de los archivos que conforman el SMAC, y se describirá qué función tiene cada uno; además se profundizará en explicar las funciones más críticas de aquellos que tienen mayor trascendencia en éste trabajo.

En el SMAC, se modela la estructura del MAC y la abstracción funcional del PHY de IEEE 800.15.4, tal que los procesos se llevan a cabo a través de mensajes entre funciones, donde cada función representa un nivel más o menos profundo entre la estructura de capas.

2.2.2.1 Funciones Importantes archivos críticos del código fuente de SMAC

Los tipos de archivos que se encuentran en SMAC se pueden dividir en tres tipos:

- Aquellos Relacionados con código de inicialización del Microcontrolador y de Puertos.

- Aquellos Relacionados con los comportamientos de la Capa Física y el MAC; son los que una vez inicializado el Hardware, lo emplean para ejecutar las primitivas de Red, dependiendo de los comandos provenientes de capas superiores.
- Aquellos Relacionados con la Capa de Aplicación; suelen consistir en el archivo principal y sus cabeceras, y pueden incluir además archivos con funciones de ayuda para la aplicación.

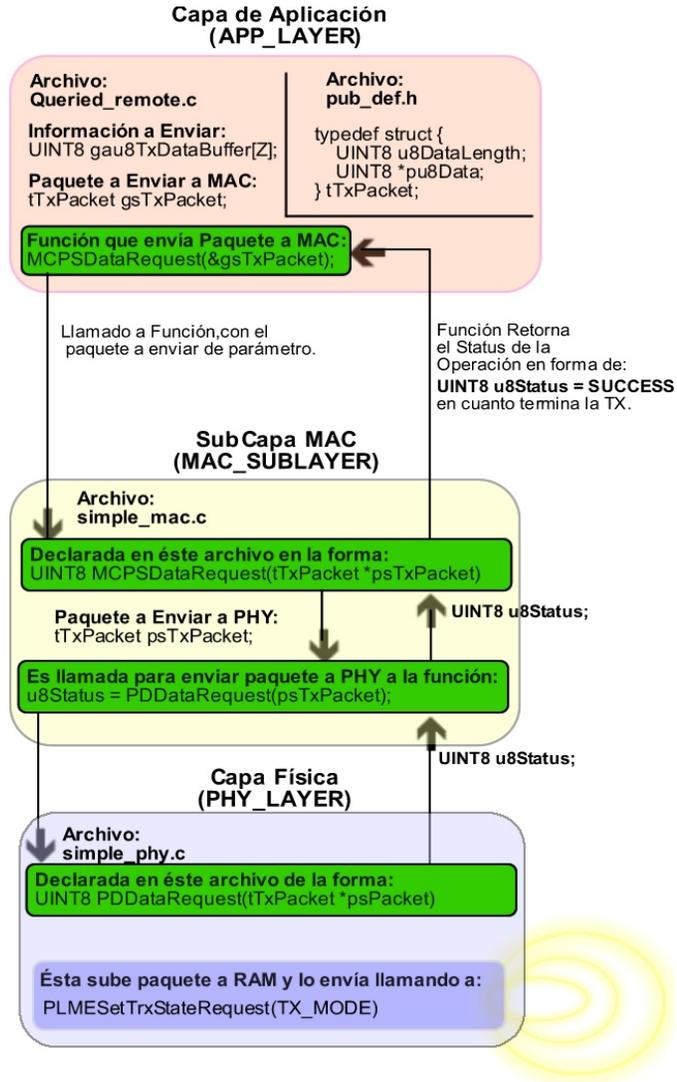
De éstos tipos de archivos, los que más son de interés para éste trabajo, son los dos últimos tipos. Del segundo tipo, los dos archivos más críticos por contener las Primitivas de SMAC, se llaman *simple_phy.c*, y *simple_mac.c*.

Ahora, para comprender mejor cómo trabajan en conjunto la Capa de Aplicación (representada por el archivo principal de la aplicación) y las Capas MAC (representada por *simple_mac.c*) y Física (representada por *simple_phy.c*) se hará seguimiento por entre las Capas, representadas entre éstos archivos, a través de las funciones que se llaman para realizar las dos tareas más importantes de toda comunicación: TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE UN DATO. El proceso de la Transmisión de un Dato, se observa en Figura 30.

El proceso de transmisión de información es sencillo; simplemente se almacena la información a enviar en la variable `gau8TxDataBuffer[Tamaño]`, y luego se llama a la función `MCPSTxDataRequest(parámetro)`, con un puntero a la ubicación de la dirección base de ésta variable. Una vez la información entra a `MCPSTxDataRequest`, ésta función llama a la función de interfaz con la PHY, llamada `PDataRequest`, y se tiene por parámetro todavía la misma ubicación de la variable que almacena la información a enviar.

Posteriormente, ésta función de Interfaz de MAC con PHY, copia los contenidos de `gau8TxDataBuffer` en la RAM del MC13192 (el radio), y llama a `PLMESTxStateRequest` con el parámetro `"TX_MODE"` para indicar al radio que éste debe enviar los contenidos que se acabaron de copiar en RAM. Entonces, `PLMESTxStateRequest` apaga la antena para RX, enciende la antena para TX, y se envía la información.

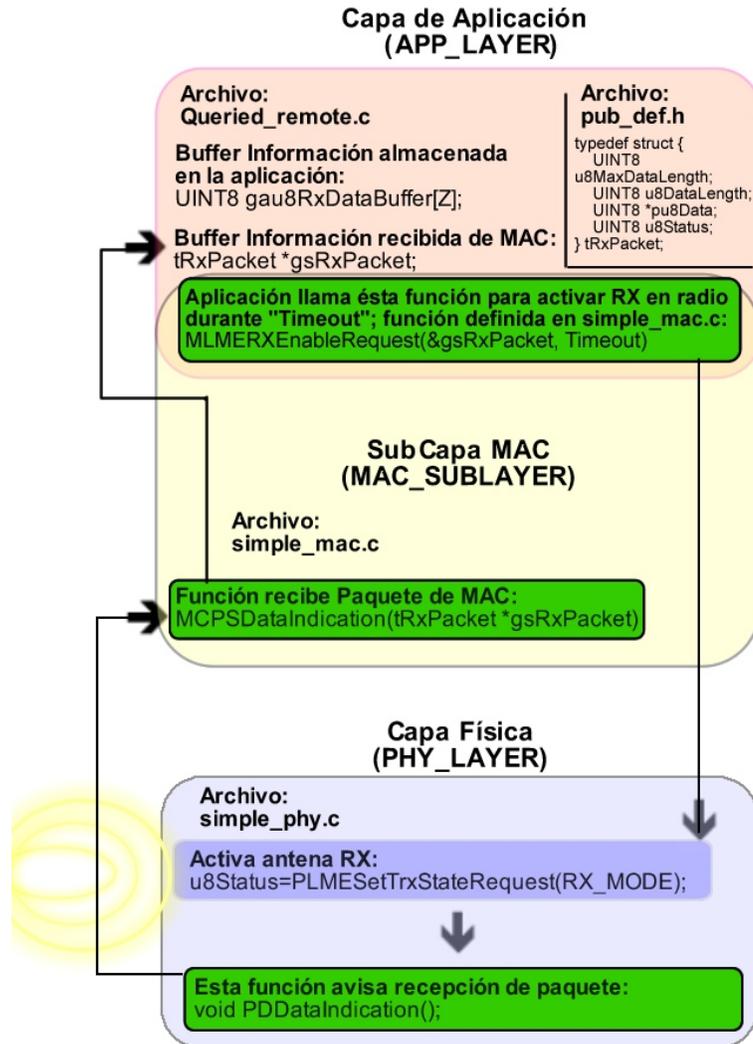
Figura 30. Proceso de transmisión de un dato con SMAC 4.1.



Obtenida con: Macromedia Fireworks.

En cuanto al proceso de la recepción de Datos, se puede observar la Figura 31.

Figura 31. Proceso de Recepción de un dato en SMAC 4.1.



Obtenida con: Macromedia Fireworks.

Para la recepción de Datos, la capa de Aplicación Activa la Antena en modo RX mediante la función de MAC LAYER MANAGEMENT ENTITY "MLMERxEnableRequest" teniendo como parámetros el puntero a "tRxPacket gsRxPacket" (cuando llegan los paquetes, estos son almacenados por el MAC en una estructura que contiene el tamaño del paquete, el estado, y los datos se almacenan ahí) y el timeout (el tiempo que va a durar

encendido en Radio en Modo RX), la cual a su vez llama a la función "PLMSESetTrxStateRequest(RX_MODE)" para controlar los procesos del Radio. Se dispone para almacenar la información, de un Buffer de Z posiciones, tipo entero 8 bits llamado "gau8RxDataBuffer[Z]" a nivel de aplicación.

Si durante ese tiempo antes de cumplirse el Timeout, se recibe un mensaje, entonces es llamada la función "PDDataIndication()" por la función "PLMSESetTrxStateRequest (RX_MODE)".

A su vez, "PDDataIndication()" de la capa PHY, llama a la función "MCPSDataIndication (tRxPacket* gsRxPacket)" de la Capa MAC, la cual transfiere los contenidos desde gsRxPacket, hacia "gau8RxDataBuffer[Z]" en la Capa de Aplicación.

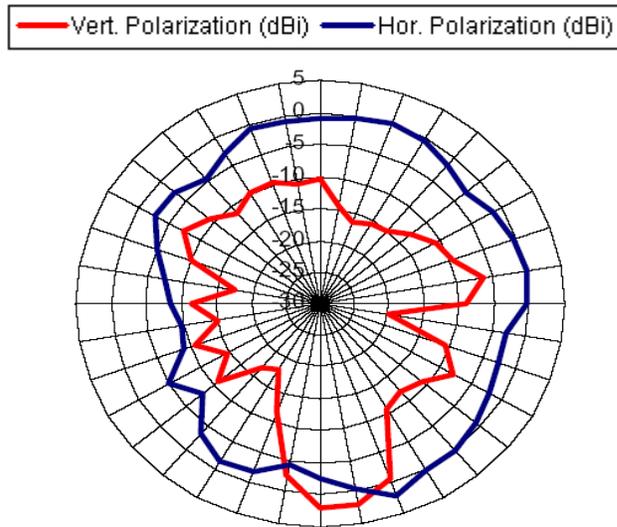
De ésta forma, es como se envían y reciben DATOS en SMAC. Para observar con más detalle el contenido de cada una de éstas funciones, consultar el Anexo B.

2.3 Otras condiciones esperadas: Patrones de Radiación

Al tratarse de un sistema que emplea Antenas, es útil conocer

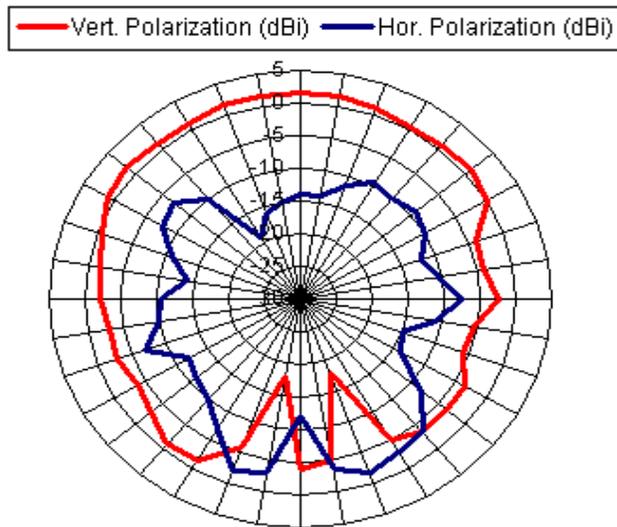
los patrones de radiación y así saber qué esperar de la comunicación dependiendo de la orientación de sus antenas. En Figura 32, se puede observar el patron de radiación Horizontal en polarización Vertical y Horizontal para una Antena F en un PCB en condiciones muy similares a aquellas del Hardware en los Módulos de Panasonic; en Figura 33, se puede encontrar el patrón de radiación Vertical.

Figura 32. Patrón de Radiación Horizontal para una Antena F (módulos Panasonic). (Cantidades en dBi)



Fuente: [TEN]

Figura 33. Patrón de Radiación Vertical, Antena F (módulos Panasonic). (Cantidades en dBi)

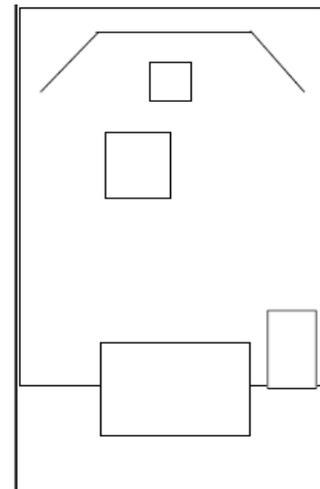
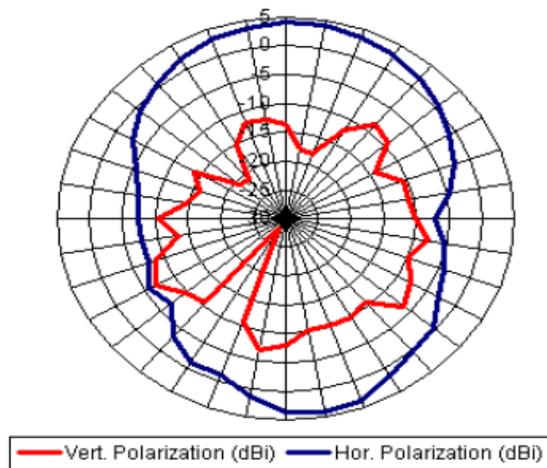


I
Posición de la Antena.

Fuente: [TEN]

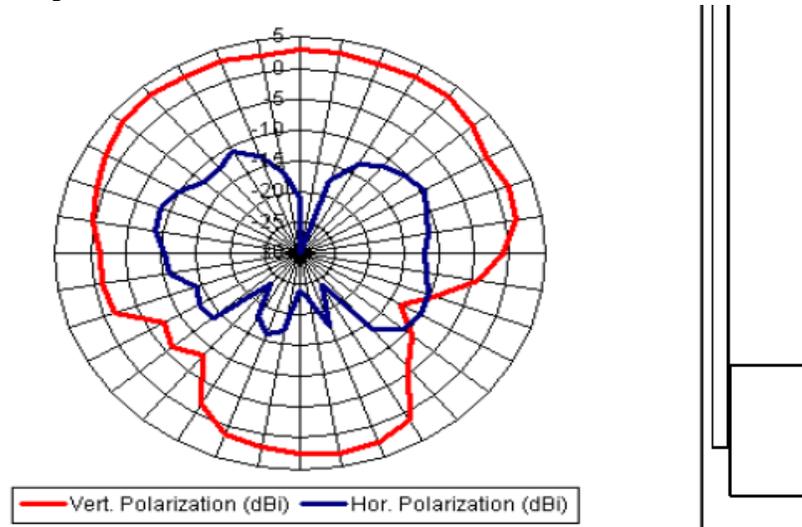
En figuras 34 y 35, se observa el patrón de radiación Horizontal y Vertical respectivamente, para Dipolo Doblado, tarjetas SARD de Freescale, datos del fabricante[TEN]).

Figura 34. Patrón de Radiación Horizontal, Antena de Dipolo Doblado (Tarjetas SARD de Freescale)



Fuente: [TEN]

Figura 35. Patrón de Radiación Vertical, Antena de Dipolo Doblado (Tarjetas SARD de Freescale)



Fuente: [TEN]

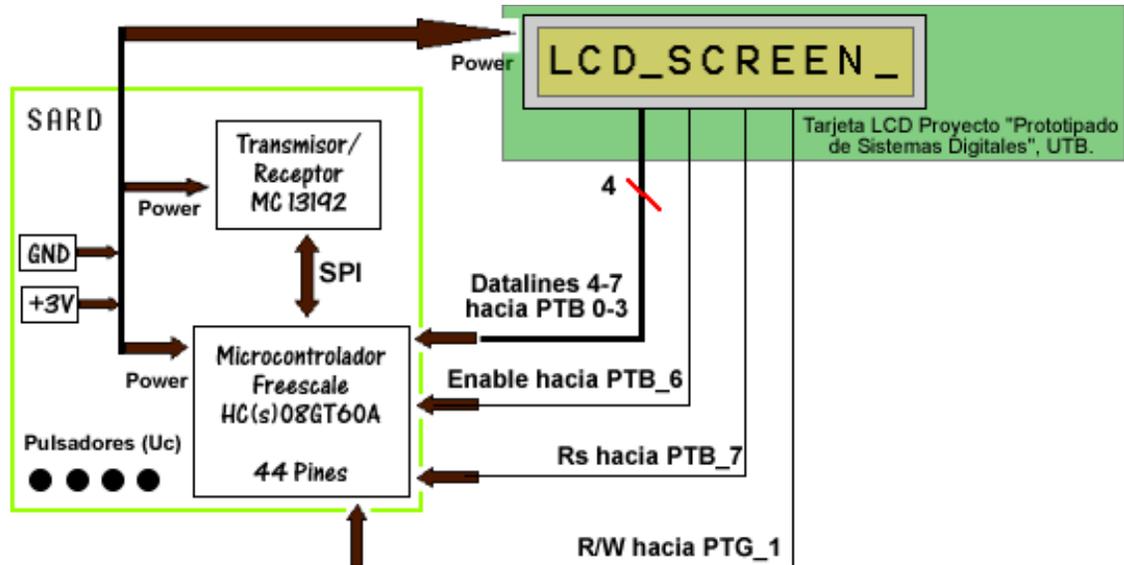
De éstos patrones de radiación, se observa que pueden haber diferencias de hasta 5dBi en las ganancias de la antena con tan sólo grados de rotación del elemento, y esto puede marcar la diferencia entre recibir o no información en un medio plagado de obstáculos como un automóvil.

2.4 Diagramas Funcionales del Sistema Propuesto

Primero, se observa en Figura 36, el diagrama conexiones del Hardware en el Nodo Sink. En éste Nodo no fué necesario un proceso estricto de diseño del Hardware, sólo interconectar

los pines apropiados de la tarjeta LCD del Proyecto "Prototipado de Sistemas Digitales", con los que el Software del Microcontrolador usa, para que corriera la interfaz.

Figura 36. Diagrama de Conexiones en el Nodo Sink.



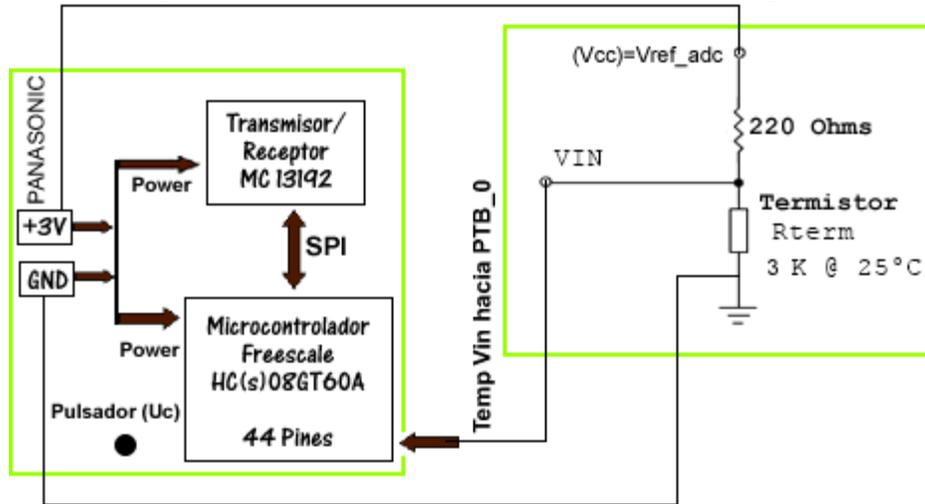
Obtenida con: Macromedia Fireworks.

A continuación, el Diagrama de Conexiones para los Nodos S1 (Temperatura Motor) y F2 (Temperatura Exterior), se observan en Figuras 37 y 38.

Ambos consisten básicamente en conectar en algún Pin disponible del Puerto B del Microcontrolador a la señal del elemento sensor, pues en Puerto B los pines se pueden configurar como Convertidor Análogo Digital. En el caso de las tarjetas de Panasonic -en las que ambos nodos están

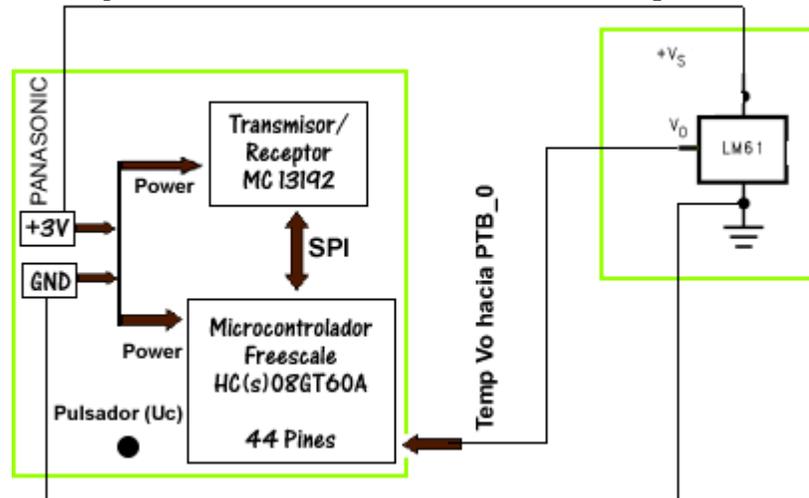
instalados- se trata de Puerto B pin cero, o pin uno.

Figura 37. Diagrama de Conexiones Nodo S1 (Temperatura Motor)



Obtenida con: Circuit Maker y Macromedia Studio

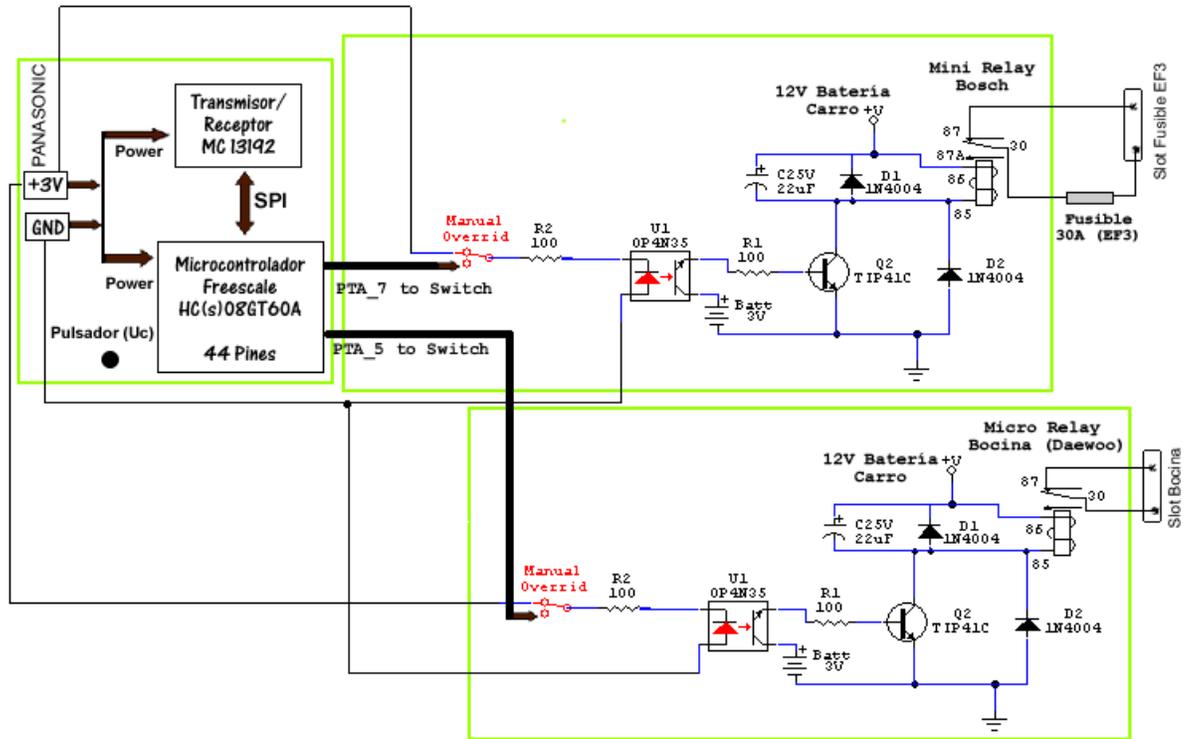
Figura 38. Diagrama Conexiones Nodo F2 (Temperatura Exterior)



Obtenida con: Macromedia Studio

Las conexiones del Nodo F1 (Relay) se pueden observar en Figura 39.

Figura 39. Diagrama Conexiones Nodo F1 (Relay)



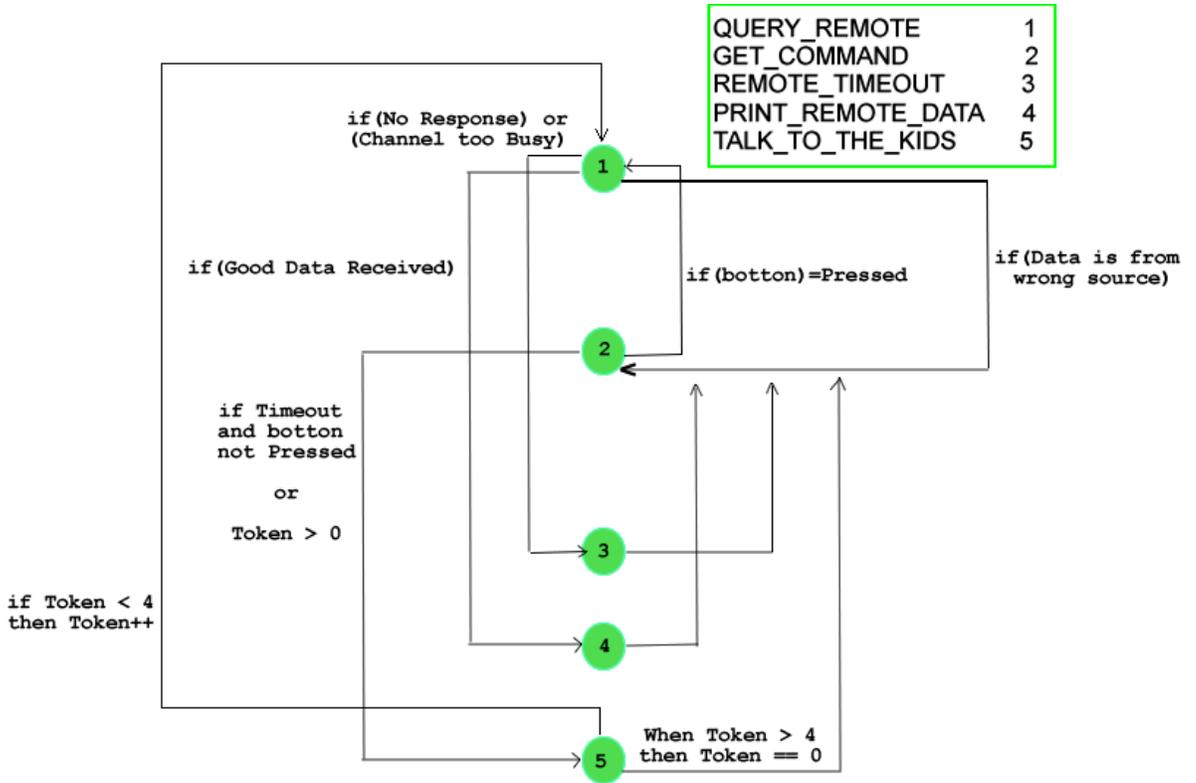
Obtenida con: Circuit Maker y Macromedia Studio

En cuanto al Nodo S2 (ACC), dado que los acelerómetros vienen incluidos en la tarjeta SARD, sólo fué necesario colocar 3 Jumpers (uno por cada eje del acelerómetro) en los sitios indicados en Anexo A2.

Ahora, se hará una descripción del software construido que implementa la red. Dado que la estructura general de éste son máquinas de estados, será la representación que se empleará para describirlos.

El diagrama de estados de la máquina que conforma al nodo Sink se observa en la Figura 40.

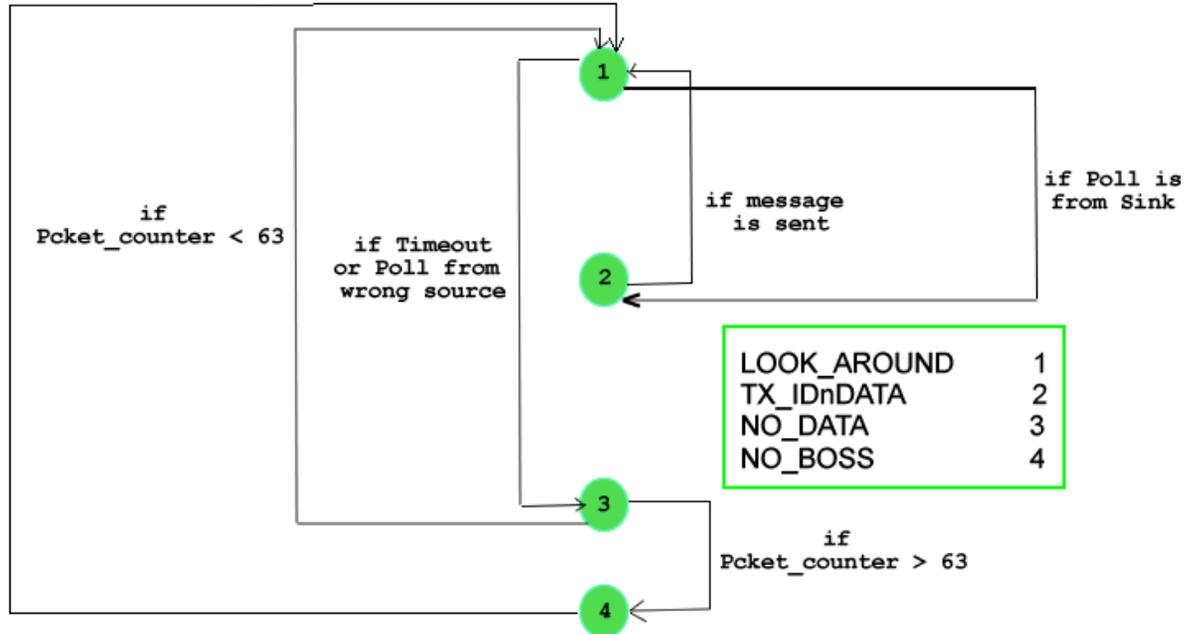
Figura 40. Diagrama de Estados del programa construido para correr el comportamiento en Nodo Sink



Obtenida con: Macromedia Fireworks

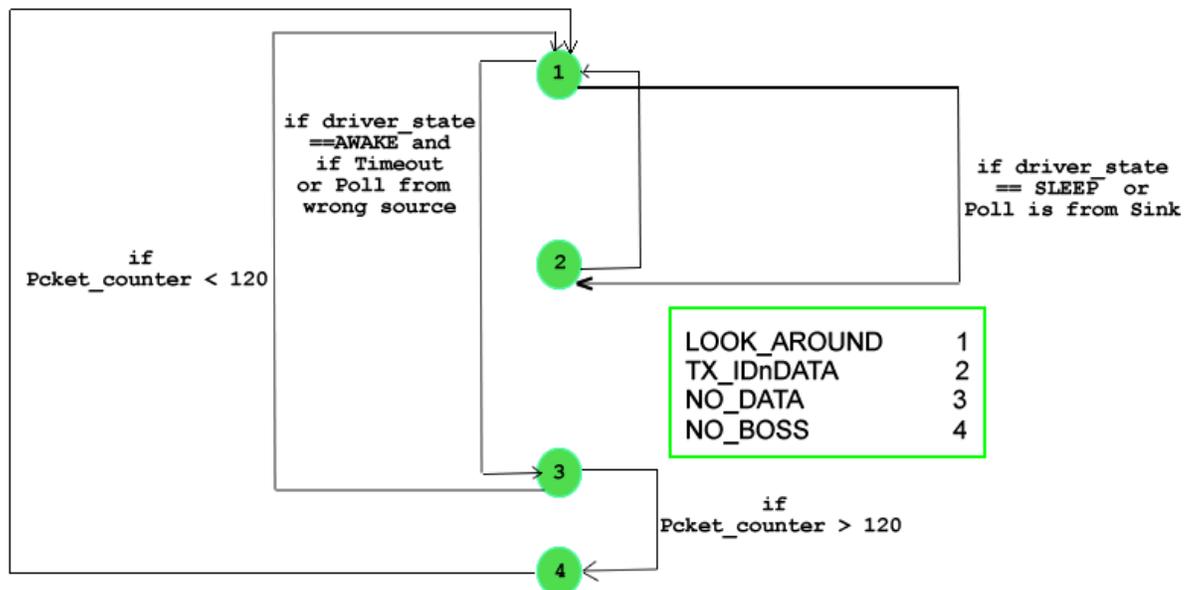
El diagrama de estados de la máquina que conforma al Nodo Relay (F1) se encuentra en Figura 41. El diagrama de estados de la máquina que conforma al Nodo Acelerómetro (S1) se encuentra en Figura 42.

Figura 41. Diagrama de Estados del programa construido para correr el comportamiento en Nodo Relay (F1)



Obtenida con: Macromedia Fireworks

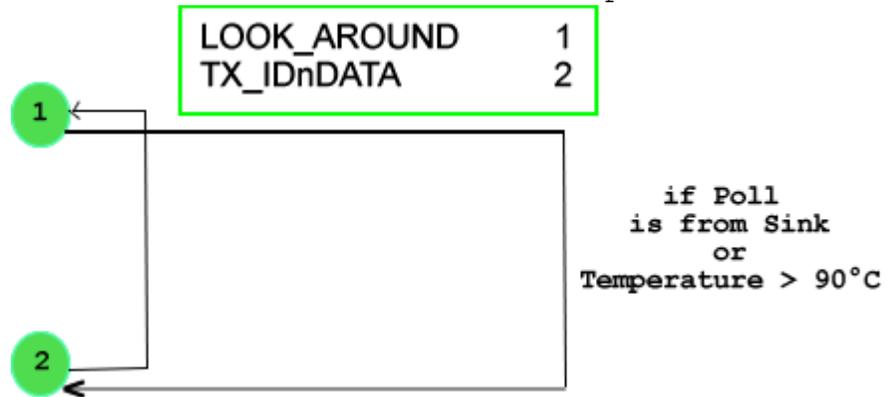
Figura 42. Diagrama de Estados del programa construido para correr el comportamiento en Nodo Acelerómetro (S1)



Obtenida con: Macromedia Fireworks

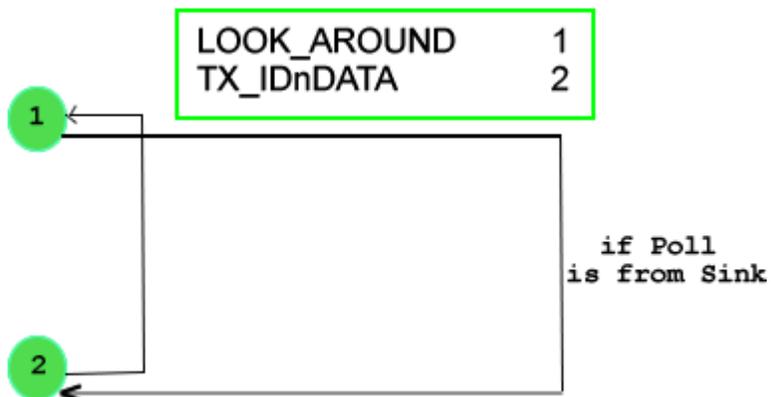
El diagrama de estados del Nodo Sensor de Temperatura del Motor se aprecia en Figura 43, y el del Nodo Sensor de Temperatura Externa se aprecia en Figura 44.

Figura 43. Diagrama de Estados del programa construido para el comportamiento de Nodo Sensor de Temperatura Motor (S1)



Obtenida con: Macromedia Fireworks

Figura 44. Diagrama de Estados del programa construido para el comportamiento en Nodo Sensor Temperatura externa (F2)



Obtenida con: Macromedia Fireworks

3. Estudio de Tiempos de Vida de Baterías entre diferentes opciones de Alimentación

Éste estudio sirve para conocer el comportamiento del voltaje de alimentación de los nodos (en especial los Panasonic) para cada modelo de entrega de datos, criterio útil a la hora de diseñar un protocolo para éste sistema, dado que es muy importante la vida de Batería.

Se comienza hablando de la alimentación para los nodos Panasonic. Éstos tienen la posibilidad de alimentarse a través de varios pines.

Una opción puede ser alimentar por el Jumper J4 (de 4 pines, encerrado dentro de una elipse fucsia en Figura 13) de donde los pines 1 y 3 (encerrados en elipse naranja en Figura 13) corresponden al GND de los pines VCC (alimentación general) y AD_REF (voltaje de referencia convertidor analogo digital del microcontrolador). El pin 2 (fuera del elipse naranja, pero enmarcado dentro del fucsia, en la izquierda, Figura 13) es el VCC, y el pin 4 es a AD_REF. Se recomienda que VCC y AD_REF se conecten juntos, tal que AD_REF no supere el voltaje de VCC. El fabricante estipula entre 2.4V y 3.3V.

Otra forma de alimentar, es a través de los pines 7 (VCC, enmarcado dentro del círculo color Aguamarina en Figura 45) y pin 8 (GND, enmarcado en círculo color Rojo en Figura 45).

Figura 45. Pines para Alimentar Nodos PAN802154HAR00



Fuente: [Anexo A1, modificada para mejorar claridad]

En cuanto a la alimentación de los Módulos SARD de Freescale, éstos se alimentan de dos maneras.

Una es a través de un jack (ver Figura 46, encerrado en círculo color azul) donde se conecta un adaptador de 9V que se alimenta a su vez a un toma de la Red Eléctrica domiciliaria. Otra es a través de baterías de 9V en el

- Sencillez y Economía en la instalación: Para alimentar los nodos con baterías externas, todo lo que se requiere son las baterías, y un conector para las mismas, donde el conector no cuesta más de 700 pesos, y unas baterías útiles para ésto se consiguen en menos de 2500 pesos.

Por otro lado, para alimentar un nodo con la batería del carro, se requiere ubicar el nodo cerca de una línea de donde pueda tomar alimentación; en caso de que ésto no se pueda, extender una para el nodo, y en ambos casos se requeriría PARA LA INSTALACION DE CADA NODO la ayuda de *una persona que conociera muy bien el cableado interno para ver de donde saca el cable, y en el peor de los casos quizá desmontar algún elemento. Esta persona, por la sola revisión y el trabajo de instalar los elementos, lo menos que puede cobrar son 70 mil pesos, más los costos de obtener una fuente para convertir de 12V-9V a 3V que necesita el nodo, y unos filtros para contrarestar la interferencia que puedan causar los transitorios del encendido del automóvil, podría significar, como poco, 6000 pesos extras por cada nodo.*

En otras palabras, comparando

* Alimentar con batería externa: Aproximadamente 2.500 COP

por cada nodo, cada varios meses.

* Alimentar batería interna: $\text{Min. } 70.000 + (6.000 * 5) = 100.000 \text{ COP.}$

Ahora, con los 100.000 COP de la instalación, se pueden comprar al menos 40 baterías de 2500 pesos cada una. Las Baterías AAA vienen en pares usualmente, y un par de baterías C cuesta menos de eso, sin contar que con una sola batería tipo CR se puede alimentar un nodo, y éstas cuestan alrededor de 1500 pesos. En otras palabras, bajo la suposición de que se empleen 2500 pesos en baterías cada 4 meses, 100.000 COP de baterías entre 5 nodos, serían 32 meses de baterías por cada nodo, según EQ 12:

$$\text{EQ 12: } \frac{(4*40)}{5} * \left[\frac{\text{mes} * \text{batería}}{\text{nodo}} \right] = 32 \text{ meses de baterías / Nodo}$$

Poco más de 2 años y medio de baterías. Claro, que si se diseña un protocolo muy eficiente en cuanto a la manera como emplea la energía, este tiempo puede aumentar significativamente.

- Ausencia de cables: Una de las premisas de hacer una solución inalámbrica es no tener que emplear cables, y así lograr una instalación lo menos invasiva posible, pues si se fueran a emplear cables de alimentación (esto implica muy probablemente desarmar parcialmente al

automóvil), ¿qué puede estar separando al diseño de armar una red cablada completamente?. Además, en el caso concreto del nodo con el Acelerómetro, éste se va a colocar en una gorra, y la presencia de un cable -de alimentación-, en la cabina del conductor y a la altura del cuello, podría hacer engorroso el uso de éste aparato, además de ser un factor de incomodidad que distraiga al conductor de su objetivo.

Así que, por Sencillez y Economía en la instalación, y buscando disminuir la presencia invasiva de los cables, se descartó alimentar los nodos con la batería del automóvil.

3.1 Pruebas de Tiempo de Descarga Completa de Baterías para Escenarios del Peor Caso

Se desea seleccionar un tipo de baterías para alimentar los Nodos Panasonic (Pues los nodos SARD deben alimentarse con baterías de 9V, ya que así está diseñada la tarjeta). Entre los tipos nominados están las baterías AAA, las tipo C, y las redondas de Litio. No se harán estas pruebas en los nodos SARD por dos razones; la primera, es porque no es funcional seleccionar un tipo de batería en particular, pues los

diseñadores de éstos módulos incluyeron un jack para baterías de 9V; la segunda, es porque la única diferencia entre los nodos de Panasonic y los SARD, es el número de Switches, y los integrados de regulación y los sensores presentes en la tarjeta SARD.

Este primer grupos de pruebas se realizan con dos objetivos.

El primero, es el de determinar experimentalmente qué comportamiento tiene un grupo de baterías ante un posible Escenario del Peor caso, para el modelo de entrega de datos por Modelo de Entrega de Datos por Eventos en Variable (Características *Grupo B*, ver capítulo 1.1 de éste documento), a partir de la curva de Voltaje de Batería Vs Tiempo.

El segundo, consecuencia del primero, es el de seleccionar qué tipo de baterías es el más adecuado para la aplicación, en los Nodos Panasonic, a partir de su comportamiento.

Las primeras 4 pruebas consisten en programar el Radio en el Módulo Panasonic para que esté activo en modo RX el 100% del tiempo, que corresponde a un posible Escenario del Peor caso para el **NODO QUE SENS**A en el Modelo de entrega de Datos por

Solicitud de Otro Nodo (en el que en un tiempo arbitrariamente largo no se le solicitan datos), y resulta ser es un Escenario del peor caso en cuanto a consumo, pues el Radio en RX consume más que en TX: Ver [MC1], en la página 9. La corriente típica que demanda el Microcontrolador en el módulo en Modo *Run* (3V, CPU_CLK 16Mhz) es de 6.5mA, y la máxima de 7.5mA. La corriente típica que demanda el radio MC13193 al encenderse en Modo RX, es de 37mA (Máximo 42mA).

Con esto, la corriente que demandaría el Módulo estaría entre 43.5 mA y 49.5mA, sin contar el consumo del Led en el módulo, el cual es menor a cinco miliamperios.

Se tomaran mediciones de Voltaje en la batería cada 10 minutos; se estipulan 8 horas de descanso por cada 12 de actividad, hasta que la batería se descargue al punto de tener 2.2V.

Para la prueba 1, se extenderá al punto de que el LED en el módulo cese de encender.

Las pruebas desde la 5 hasta la 7, son escenarios del Peor Caso para el NODO QUE SOLICITA LOS DATOS, en el Modelo de Entrega de Datos por Solicitud de otro Nodo. Su operación se

describirá más adelante.

La prueba Número 8, representa un escenario del Peor caso para el Modelo en Entrega de Datos de Entrega Continua, para el NODO QUE DEBE ENTREGAR LOS DATOS, y consiste en dejar encendido el radio en modo TX, el 100% del tiempo (es la contraparte de las Pruebas 1-4, pero con las baterías que se seleccionen después de ese primer grupo de pruebas).

Para todas las pruebas, se sincroniza la actividad del radio con un LED en el módulo, y el microcontrolador activo en modo run mientras hace el proceso de activación del Radio en el modo que se requiera; después de activar el radio en RX la primera vez, éste entra en modo *Wait*, donde consume menos corriente [MC1]. En Tabla 11 se pueden observar las características de las baterías sobre las que se hicieron Pruebas de la 1 a la 4 Pruebas de la 1-4*

La prueba número 1, consiste en comprobar experimentalmente en qué voltaje REALMENTE dejan de funcionar los Módulos Panasonic; la misma, sirve para comprobar en qué tiempo se alcanza el Voltaje mínimo de funcionamiento que el fabricante estipula para los Módulos (2.2V) para ésta batería, y tomar

*Las mediciones para estas 4 primeras pruebas, se tomaron con un Multímetro Digital marca Tech, en la escala de 20V, donde se obtenían dos cifras significativas después del punto decimal.

éste valor para compararlo con el que le tome a los otros tipos de baterías que aparecen en Tabla 11.

Tabla 11. Condiciones para las Pruebas de Descarga de Baterías en Nodos Panasonic (*Temperatura ~25°C*) - *Worst Case Scenario*.

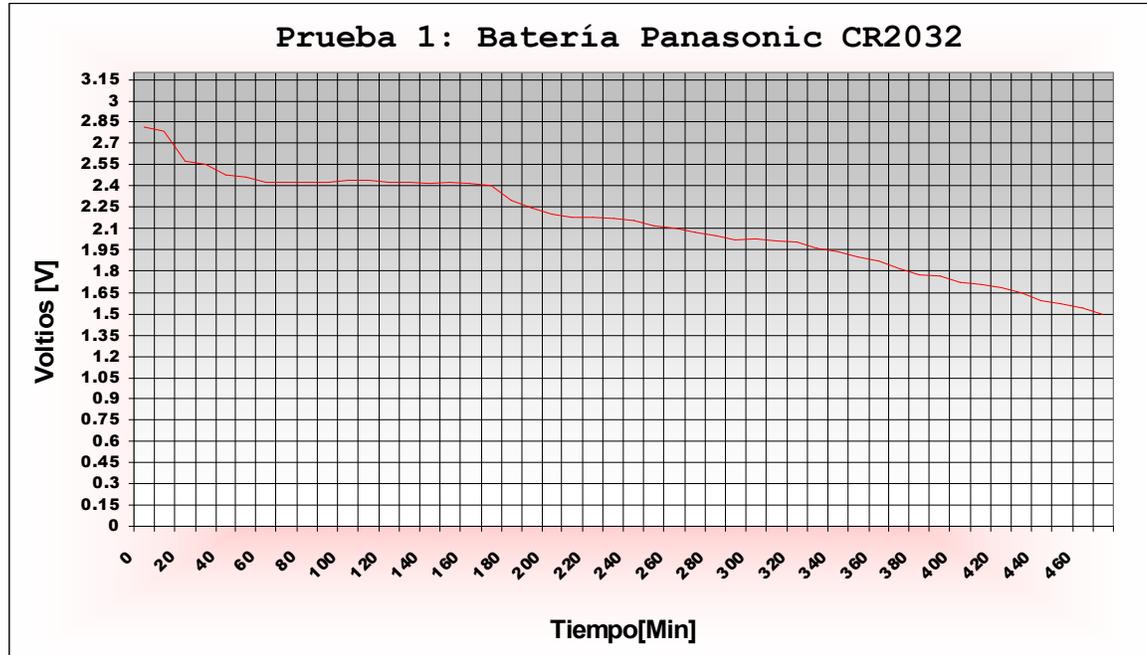
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Tipo de Baterías	CR-2032 (Litio, 3V)	CR-2032 (Litio, 3v)	AAA, R03 (Zinc, 1.5V)	C (ZN-Carbón, 1.5V)
Fabricante	Panasonic	Sony	Tronex	Eveready
Capacidad (mAh)	220mAh	220mAh	800mAh (baterías genéricas Zinc)	4Ah
Voltaje Inicial Vacío	3.20V	3.31V	Pilas 1 y 2 en Serie: 3.15V	Pilas 1 y 2 en Serie: 3.08V
Valor Comercial	1200 COP	1200 COP	1100 COP (El par)	1300 COP (Cada Una)
Cantidad	1	1	2, en serie	2, en serie

A partir de ésta comparación, y de una estimación de duración de baterías bajo distintas condiciones en distintos Modelos de Entrega de Datos, se selecciona un tipo de baterías para el Grupo posterior de pruebas.

- **PRUEBA 1 En WORST CASE SCENARIO (Escenario del Peor Caso).**

En total tardó 470 minutos, es decir 7 horas y 50 minutos en descargar la batería al punto que el Módulo de Panasonic ya no encendiera, situación a la que se llegó en el punto de alcanzar las baterías los 1.5V, y tan solo 3 horas y 20 minutos en llegar a los 2.2 V, como se observa en Figura 47.

Figura 47. Gráfica de Voltaje de Batería contra Tiempo obtenida en Prueba 1, hasta descarga a 1.5V



Obtenida con: Microsoft Excel

Sin embargo, a partir de que la batería bajó de los 2V, el Led del Módulo empezó a brillar con intensidad notoriamente menor de la normal; ésto era de esperarse, dado que Panasonic especifica en Anexo A1 (página 5) que se alimente con entre 2.2V y 3.4V.

- ***PRUEBA 2 En WORST CASE SCENARIO (Escenario del Peor Caso).***

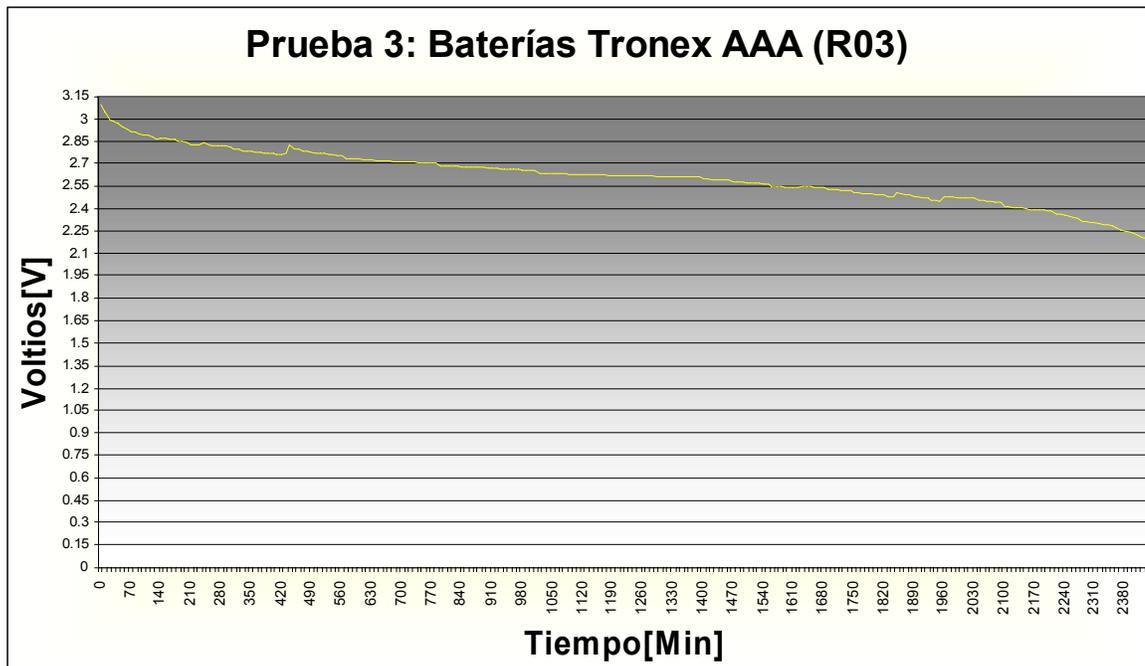
Fallida, pues el Módulo no encendió. Éstas baterías restringen la corriente que entregan a 0.2mA, y para encender los radios en modo RX se necesitan al menos 35mA.

La prueba sirvió para comprobar que a pesar de que dos pilas del sean del mismo tipo y de capacidades ligeramente diferentes, hay que verificar cuanta corriente pueden entregar constantemente (Ver "*Features*" de las baterías Panasonic en Anexo A5).

- ***PRUEBA 3 En WORST CASE SCENARIO (Escenario del Peor Caso).***

El Módulo de Panasonic tardó 2435 minutos (aproximadamente 40 horas y 35 minutos) en descargar las baterías AAA a 2.2V. Se observa una gran diferencia en la duración respecto a la prueba #1, y ésto es de esperarse, ya que se trata de dos baterías que se colocaron en serie, esperándose una duración mayor a la de una sola batería CR2025. Ver resultados de ésta prueba en Figura 48.

Figura 48. Gráfica de Voltaje de Batería contra Tiempo obtenida en Prueba 3, hasta descarga a 2.2V

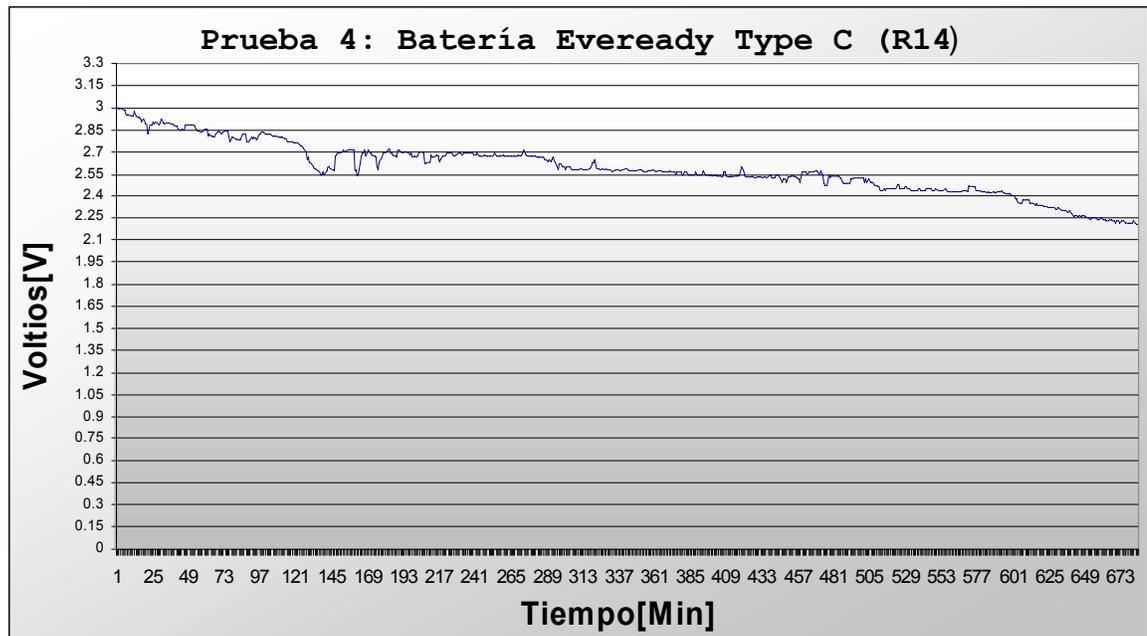


Obtenida con: Microsoft Excel.

- **PRUEBA 4 en WORST CASE SCENARIO (Escenario del Peor Caso).**

Se necesitaron 6830 minutos de actividad del Módulo (aproximadamente 113 horas, 50 min), en las condiciones de prueba mencionadas, para descargar la batería de su valor inicial, a 2.2V. Ver Figura 49.

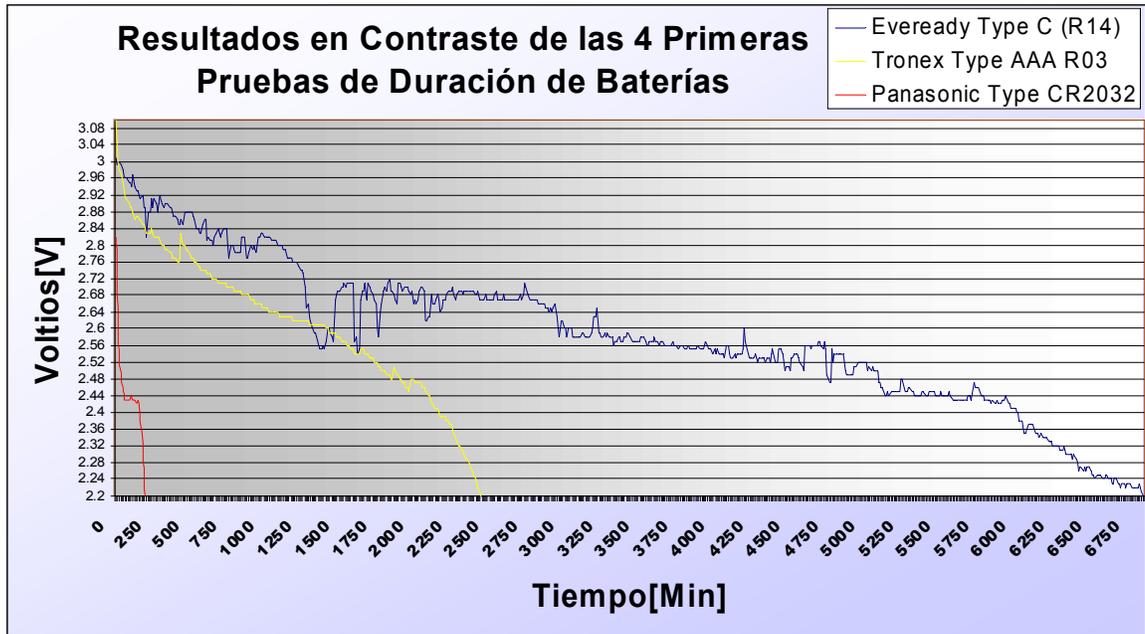
Figura 49. Gráfica de Voltaje de Batería contra Tiempo obtenida en Prueba 4, hasta descarga a 2.2V



Obtenida con: Microsoft Excel.

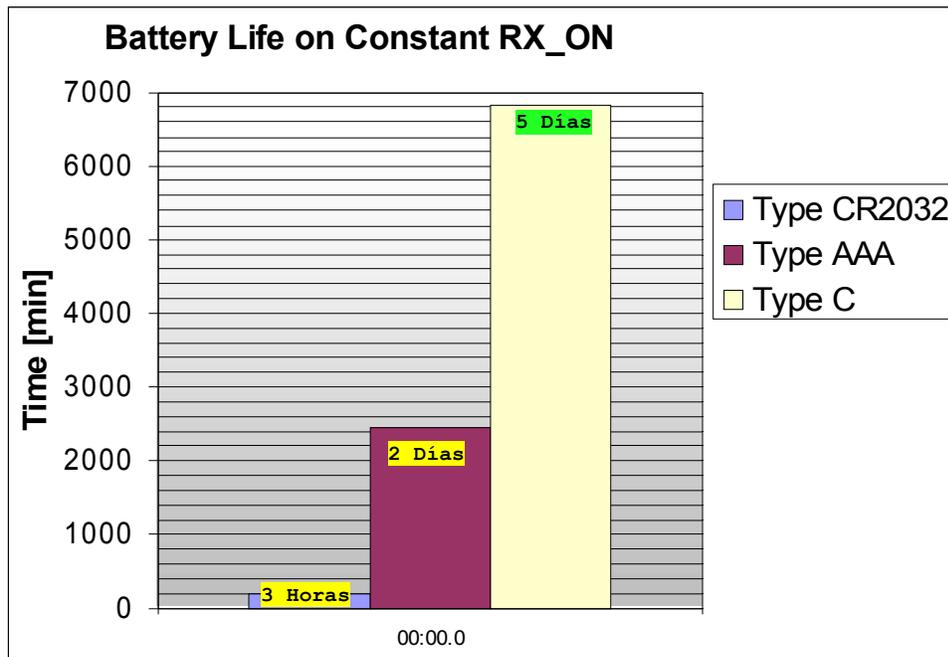
A continuación, en Figura 50., se pueden observar todas las gráficas de las pruebas para WORST CASE SCENARIO (es decir, RX encendido constantemente, en las condiciones mencionadas al comienzo de esta sección) a fin de poder comparar el rendimiento de cada batería con el de las otras en las pruebas, y en Figura 51, los tiempos de duración en contraste para las pruebas que se observan en Figura 50. Se observa que la batería que menos duró, fué la CR2025 de Panasonic, y la que más duró, la Eveready tipo C.

Figura 50. Resultados en Contraste de Pruebas de Duración de Baterías para *WORST CASE SCENARIO*



Obtenida con: Microsoft Excel

Figura 51. Tiempos de Duración en Contraste para Pruebas de Duración de Baterías para *WORST CASE SCENARIO*



Obtenida con: Microsoft Excel

En sección 1.1.1 de éste documento, se estableció que es deseable que el sistema administre adecuadamente su energía, por comodidad del usuario y por confiabilidad del sistema, pues sin energía los nodos inevitablemente fallarán. Sin embargo, no se habló de un TIEMPO DE DURACIÓN deseable. Por ésto, se establece un mínimo de 3 meses como tiempo estimado deseable de duración de baterías.

La duración de la batería con mayor capacidad, en las condiciones del Escenario del Peor Caso, fué un poco menor a 5 días (Batería Tipo C), la siguiente fué un poco menor a 2 días (Batería AAA), y la de menor, fué poco más de 3 horas, como se aprecia en Figura 51. Se entiende por éstos resultados que no es viable emplear un modelo de entrega de datos que mantenga constantemente encendido el Radio, pues así las baterías no podrán durar los 3 meses estipulados.

En Tablas 12 y 13, se observa la estimación de la duración de cada tipo de baterías, ante distintos modelos de entrega de Datos con ahorro de energía; cabe aclarar que esta estimación no es del todo realista, sin embargo es un bosquejo PARA EL PEOR CASO de la duración de una batería, a partir de donde guiarse para seleccionar alguna. La estimación se hizo empleando la ecuación EQ 13:

$$\text{EQ 13: Duración [min]} = \frac{Tw \text{ [Min]}}{D \text{ (Min/Min)}}$$

1. Donde Tw es el Tiempo que tardó en descargar cada batería a 2.2 V en la prueba de *Worst Case Scenario*, y D el *Duty Cycle* (Ton/Toff; Ton es la suma de T_Rx mas T_Tx, y Toff es el mismo T_sleep en la parte superior de la tabla). Para los Datos de Tw, leer las cuatro pruebas de *Worst Case Scenario* que se realizaron en antes. Para ver los diagramas de flujo con el comportamiento de los nodos ante la situación de ahorro de energía, ver Figuras 20 y 21.

Tabla 12. Estimación de duración de cada tipo de baterías para el Modelo de Entrega de Datos por Eventos en Variable, tomando **Tiempo Rx + Tiempo Tx= 0.009 s**

Tipo de Baterías	Duración	t_sleep= 40s D = 0.0225 %	t_sleep= 80s D = 0.01125 %	t_sleep= 120s D = 0.0075 %
Tipo CR2032	Duración [min] =	2'088.889	4'177.778	6'266.667
	Duración [Hrs] =	34.815	69.630	104.444
	Duración [Días] =	1.451	2.901	4.352
Tipo AAA	Duración [min] =	10'822.222	21'644.444	32'466.667
	Duración [Hrs] =	180.370	360.741	541.111
	Duración [Días] =	7.515	15.031	22.546
Tipo C	Duración [min] =	30'355.556	60'711.111	91'066.667
	Duración [Hrs] =	505.926	1'011.852	1'517.778
	Duración [Días] =	21.080	42.161	63.241

Y en Tabla 13, se puede observar la misma estimación con el

Modelo de Entrega de Datos por Solicitud de Observador.

Tabla 13. Estimación de duración de cada tipo de baterías para el Modelo de Entrega de Datos por solicitud de observador, tomando **Tiempo_Rx + Tiempo_Tx= 0.007 s**, y asumiendo que siempre hay una solicitud del observador.

Tipo de Baterías	Duración	<i>t_sleep= 1.7s</i> <i>D = 0.412 %</i>	<i>t_sleep= 1.2s</i> <i>D = 0.583 %</i>	<i>t_sleep= 1s</i> <i>D = 0.7 %</i>
Tipo CR2032	Duración [min] =	114.143	80.571	67.143
	Duración [Hrs] =	1.902	1.343	1.119
	Duración [Días] =	79	56	47
Tipo AAA	Duración [min] =	591.357	417.429	347.857
	Duración [Hrs] =	9.856	6.957	5.798
	Duración [Días] =	411	290	242
Tipo C	Duración [min] =	1'658.714	1'170.857	975.714
	Duración [Hrs] =	27.645	19.514	16.262
	Duración [Días] =	1.152	813	678

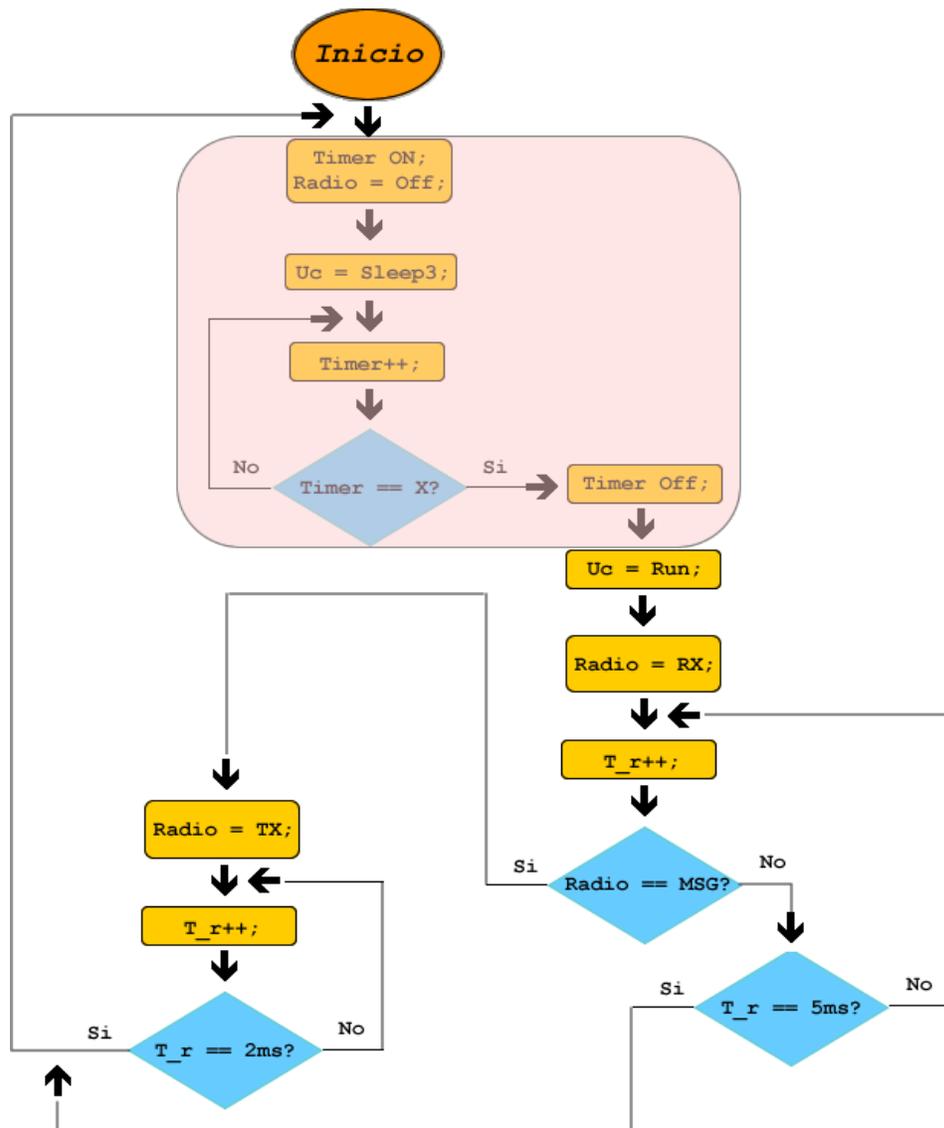
A continuación se pueden observar los diagramas de Flujo describiendo comportamiento de nodos en Pruebas posteriores, de donde se obtuvo la estimación en las Tablas 12 y 13.

En Figura 52, se representa un comportamiento generalizado de las pruebas 5-7, si se retira el bloque enmarcado en color rosado, y el observador hace solicitudes cada 40, 80 y 120 segundos respectivamente.

Asimismo, las pruebas 12-14 se representan en la extensión completa del diagrama, incluyendo el bloque rosado, donde X

representa el tiempo que durará en inactividad el radio. Éstos tiempos se pueden apreciar en las Tablas 7 y 8 bajo el nombre de "t_sleep".

Figura 52. Diagrama de Flujo simplificado del comportamiento del nodo de prueba para el MODELO DE ENTREGA DE DATOS POR SOLICITUD DEL OBSERVADOR (Pruebas 5-7 12-14)

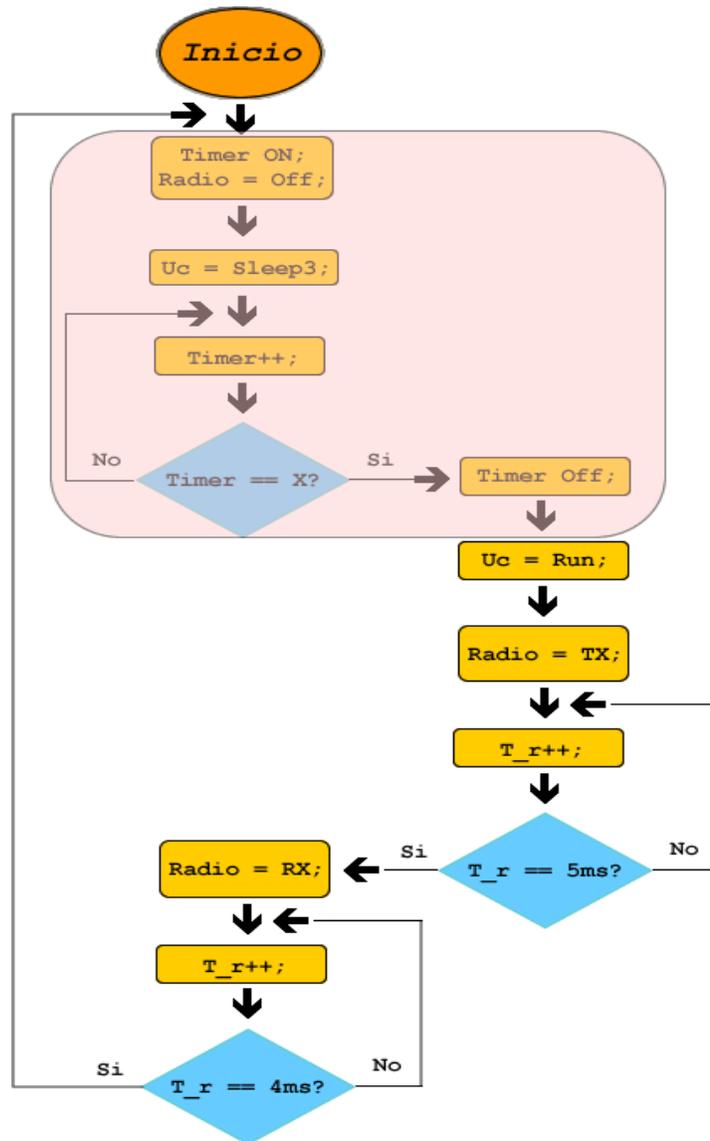


Obtenido con: Macromedia Fireworks

Y en Figura 53, se representa la Prueba 8 cuando se le retira

la sección enmarcada en rosado, y las pruebas 9-11 cuanto se incluye ésta sección, donde X nuevamente, representa el tiempo que durará en inactividad el radio.

Figura 53. Diagrama de Flujo simplificado del comportamiento del nodo de prueba para el MODELO DE ENTREGA DE DATOS POR EVENTOS EN VARIABLE SUPERVISADA (Pruebas 8-11)



Obtenido con: Macromedia Fireworks

Ahora, se procede a seleccionar una batería que cumpla con el tiempo establecido de vida para todos los posibles escenarios. Las que cumplen con ésta condición son las baterías Tipo C, y Tipo AAA.

Entre éstas dos, aunque la duración de la Tipo C es más del doble a la duración en la AAA para algunos casos, se encuentra que considerando el precio, el peso, y el volumen de las baterías C, que suelen costar el triple, pesar más del doble en algunos casos y tener un volumen un poco mayor al de las AAA, se decide que las baterías AAA son suficientes, y con éstas se harán las demás pruebas.

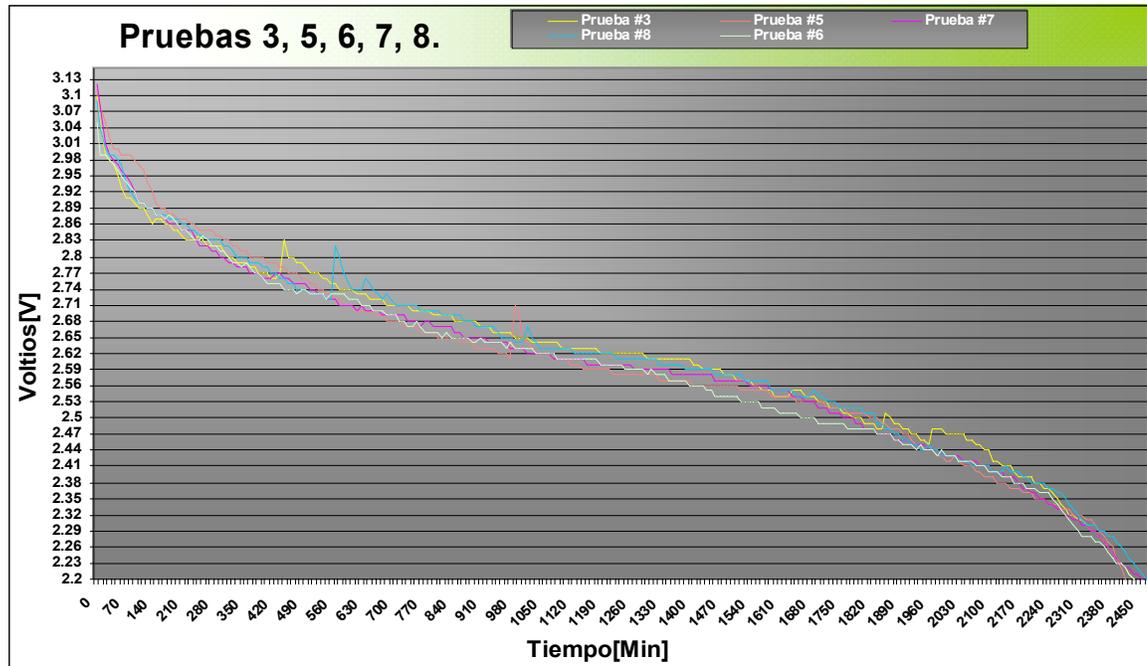
Sobre todo, porque las baterías AAA seleccionadas para ésta prueba se seleccionaron de bajo rendimiento y bajo costo a propósito, así que es razonable esperar que con unas baterías AAA de mayor calidad, se pueda tener un mejor desempeño.

A continuación, los resultados de las Pruebas 5-8, descritas anteriormente, se muestran a modo de comparación en Figura 54, junto con los resultados de la Prueba 3 (Caso del Peor Escenario, Baterías AAA).

Como instrumento de medida, se empleó para todas las pruebas

el mismo multímetro marca Tech con 2 cifras significativas de precisión que en Prueba 3.

Figura 54. Resultados en Contraste de Pruebas de Duración de Baterías # 3(Amarillo), #5(Salmón), #6(Verde), #7(Fucsia), y #8(Azul)



Obtenida con: Microsoft Excel.

Se observa que la duración de las pruebas es similar, al igual que el comportamiento de la curva de caída, sin importar las peculiaridades de cada par de baterías (del mismo tipo, AAA Heavy Duty, marca Tronex). Sobre ésta curva se observa que *las pendientes más inclinadas* se presentan cuando el voltaje de las baterías se encuentra entre 3.1 y 2.7 Voltios, y entre 2.4 hasta 2.2V, teniendo un área con pendiente baja entre 2.7 y 2.4 voltios.

Los tiempos de duración de baterías de ésta prueba, indican que no es eficiente (en cuanto a manejo de la energía), tener el radio encendido constantemente, sea en modo RX o en modo TX, y por esta razón es necesario buscar la manera de evitar esta situación, disminuyendo los tiempos que el radio esté encendido.

3.2 Pruebas de Voltaje de Baterías en un Tiempo dado, para Modelos de Entrega de Datos con ahorro de Energía.

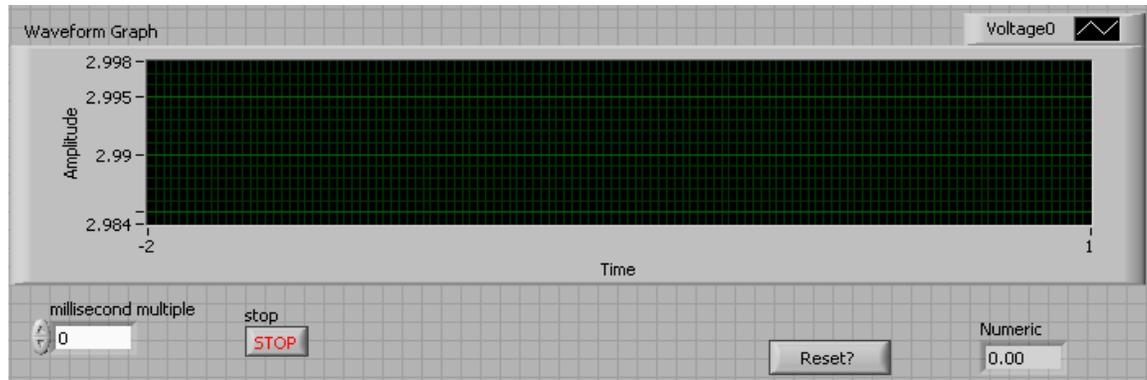
Se tendrán dos casos Modelos de Entrega de Datos con ahorro de Energía para este grupo de pruebas. Todas las pruebas siguientes se hicieron con la Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB-6009, y LabView 8.0.

La aplicación con la que se hizo la adquisición de Datos fue LabView.

En ésta interfaz, en Figura 55, se escribió en el recuadro de "milisecond multiple" la cantidad 60.000 (que significa 60 segundos por minuto, por 1000 milisegundos por segundo) para que el programa tomara muestras cada minuto. Los resultados

el programa los escribe en un documento de texto plano en un directorio que se le especifique.

Figura 55. Interfaz Gráfica de Captura de Datos



Fuente: LabView 8.0

En el Primer caso, el evento de interés es esperar la solicitud de datos de otro nodo (Modelo de Entrega de Datos por Solicitud de otro nodo).

Consiste en 3 pruebas (#12-#14), en las que se apaga el Radio y entra al microcontrolador en hibernación modo STOP 3 (el Uc pasa a consumir XX uA) durante un tiempo "X", que vale entre 1 segundo, 1.2 segundos, y 1.7 segundos para cada prueba.

Luego sale de hibernación y enciende el receptor del radio por 5 ms, esperando una petición de información por parte del Nodo Sink. En caso de que el Nodo Sink haga una petición, se cambia a modo TX, y se envía un paquete de datos de 11 bytes

(que, incluyendo bits de cabecera, es poco menos de 2ms a 150Kbps).

Se toman dos medidas: Primeramente se tomaron las formas de Onda del Voltaje de Batería a 4000 muestras/segundo, a través de las entradas análogas de una tarjeta de Adquisición de Datos National Instruments 6009, para cada valor real de "t_sleep" (Ver Figura 56).

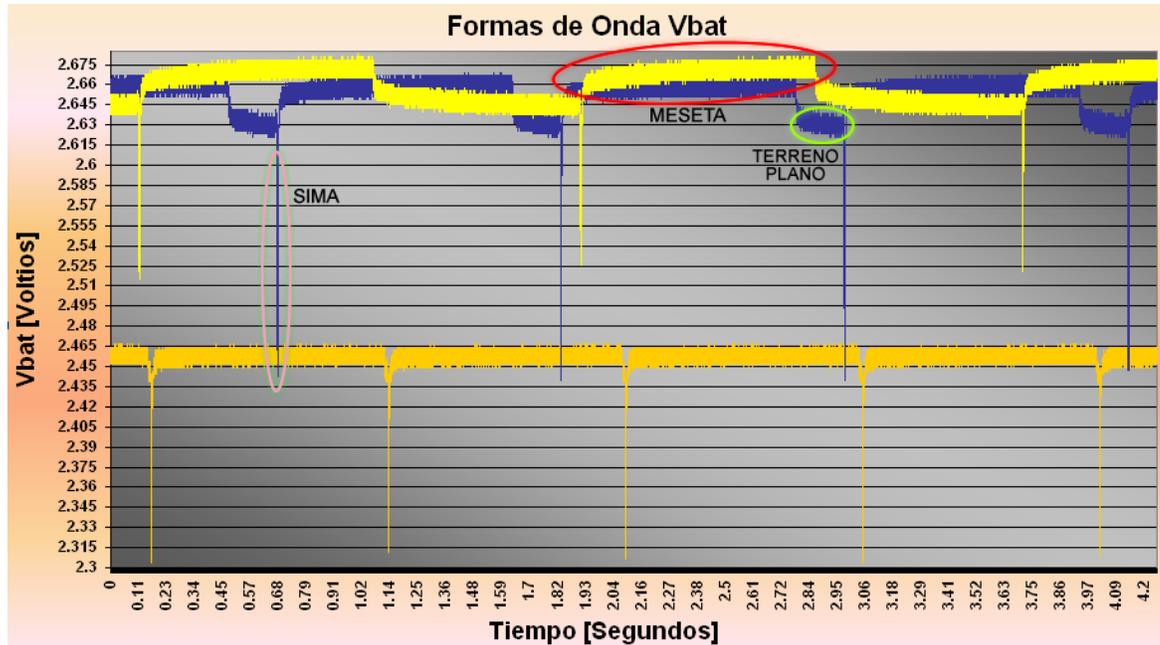
Obsérvese que la forma de onda correspondiente al tiempo de duración se trasladó a la parte inferior del diagrama, pues fué tomada con baterías ampliamente usadas a fin de verificar si estas formas de onda características se repetían aún con voltajes relativamente bajos.

Éstas formas de onda son útiles para observar los efectos del encendido y apagado del radio sobre la alimentación; principalmente se observan tres regiones en éstos pulsos:

- La Sima (Encerrado en Rosa en Figura 56): aquella caída abrupta en las formas de onda; ocurre con una periodicidad acorde a la esperada según el comportamiento del encendido del radio y del LED, que se programó en el nodo para cada caso.

- La Meseta (encerrada en Rojo en Figura 56), que representa los estados de la forma de onda donde mayor voltaje se tiene, y ocurren después de la Cima. Se tiene el mayor voltaje en estos estados, pues aquí se realizaron las operaciones:
 - Cambiar la fuente de señal de reloj del microcontrolador (generada por el MC13192), hacia la fuente interna de reloj (generada por el propio Uc).
 - Hibernar al radio (este consumirá menos de 3uA).
 - Conmutar el Uc a modo STOP3 de ahorro de energía (este consumirá menos de 1uA).

Figura 56. Formas de Onda de prueba de los Voltaje de Batería ante tiempos de hibernación de 1s(aprox 0.96s, Naranja) 1.2s (aprox 1.15s, Azul Oscuro), 1.7s (aprox 1.74 s, Amarillo) a 4000 muestras/segundo (pruebas #12 - #14)



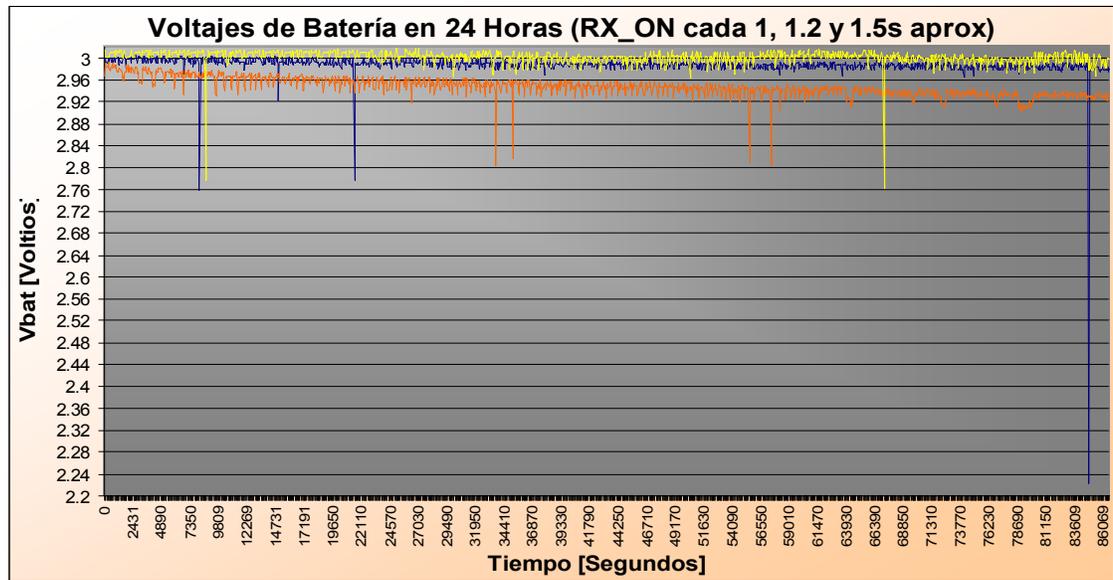
Datos Obtenidos con: NI Labview 8.0 y Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB-6009.

Gráfica Obtenida con: Microsoft Excel.

- El Terreno Plano (enmarcado en Verde en Figura 56), donde se llama una función que Corre ciclos de No Operación hasta completar un tiempo determinado por el programador. Para la forma de onda naranja, el número de Ciclos de No Operación fué de 2 ciclos apenas, mientras que para las otras formas de onda fué de decenas (azul) y varios cientos (amarilla). Puede observarse entonces, que el estado que tiende a prolongarse, al contar por cuánto tiempo estará el radio apagado, es Terreno Plano.

Entre Terreno Plano y Sima, se enciende el Radio, se devuelve el control de la señal de reloj del Uc al mismo, y una forma de que el Uc salga del estado de STOP3 será al activarse el Pin del IRQ (el cual está conectado al Radio).

Figura 57. Gráfica de Voltajes de baterías después de 24 horas de uso para cada "t_sleep": Amarillo, cada 1.5s. Azul, cada 1.2s. Naranja, cada 1s. (Pruebas #12-#14)



Gráfica obtenida con: Microsoft Excel.
 Datos obtenidos con: NI Labview 8.0 y Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB-6009.

Para las pruebas, se dejó correr libremente los nodos conectados a baterías nuevas, por un lapso de 24 horas, para cada uno de los t_sleep, conectados a una tarjeta de adquisición de datos (NI-USB-6009) que tomaba muestras cada minuto del Voltaje de la batería. En las curvas de Figura 57, se pueden observar las diferencias entre voltajes de batería

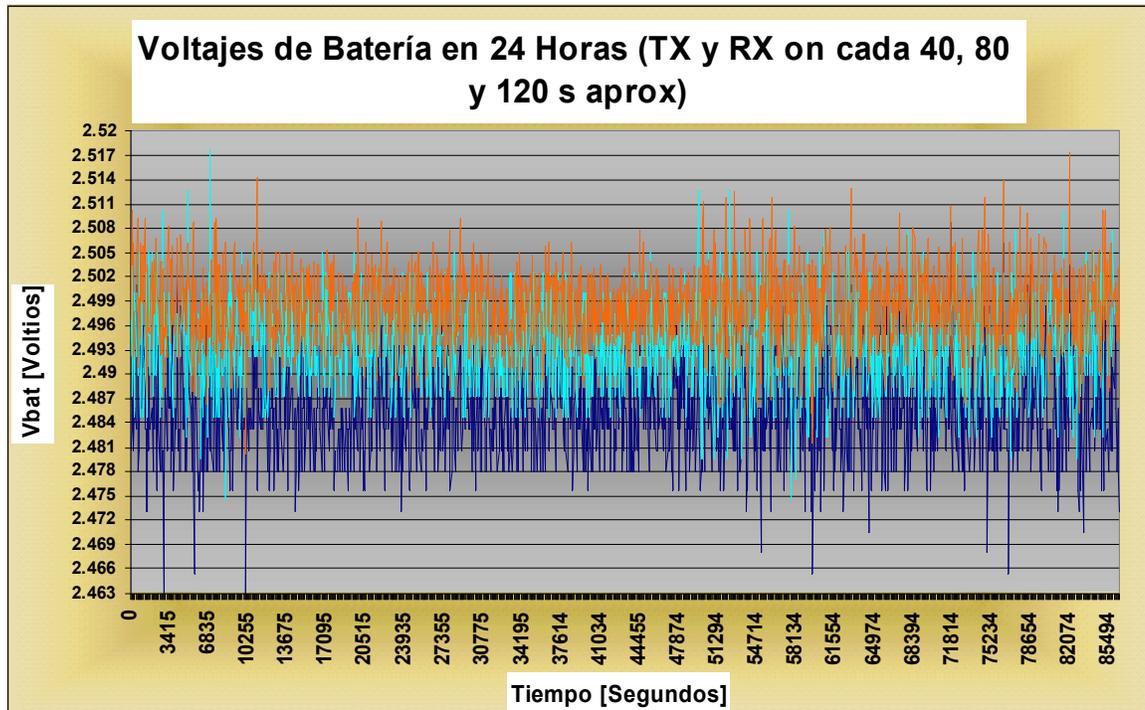
en 24 horas, para cada "*t_sleep*".

Se observa que para todos los casos no hubo caídas significativas de voltaje, a pesar de estar en la región donde más sensibles son las baterías a disminuir voltaje; se observan algunos picos (ver las últimas muestras en azul y amarillo) que se atribuyen a perturbaciones externas.

En el Segundo caso, el evento de interés será la entrega del estado de una medida cada cierto tiempo (Modelo de Entrega de Datos por Eventos en Variable).

Son 3 pruebas (#9-#11). Cada 40, 80 y 120 segundos, que se transmitirá, estando el Radio en modo TX por aproximadamente de 5ms, y luego cambia a modo RX por 4ms, esperando el acuse de recibo; el resto del tiempo, el Uc permanecerá en modo SLEEP 3, y el radio permanecerá apagado. Se repite el procedimiento mencionado anteriormente de adquirir las formas de la gráfica del Voltaje durante 24 horas, tomando una muestra cada minuto (Figura 58).

Figura 58. Gráfica de Voltajes de baterías después de 24 horas de uso para cada "t_sleep". (40s en Aguamarina, 80s en Azul oscuro, y 120S en Naranja)



Obtenida con: Microsoft Excel, a partir de datos tomados con Labview 8.0 y Tarjeta de Adquisición de Datos NI-USB-6009.

Se observa que no hay una caída significativa en el nivel del voltaje: a través de las 24 horas, se puede trazar una línea casi sin pendiente a través de la región central de cada grupo de muestras, y tener pocas discontinuidades, es casi imperceptible la disminución del voltaje. La discusión sobre los resultados anteriores en referencia al Modelo de Entrega de Datos seleccionado, y el protocolo que se diseñe en base a éste, se hace en la sección de "Diseño del Software".

4. Implementación

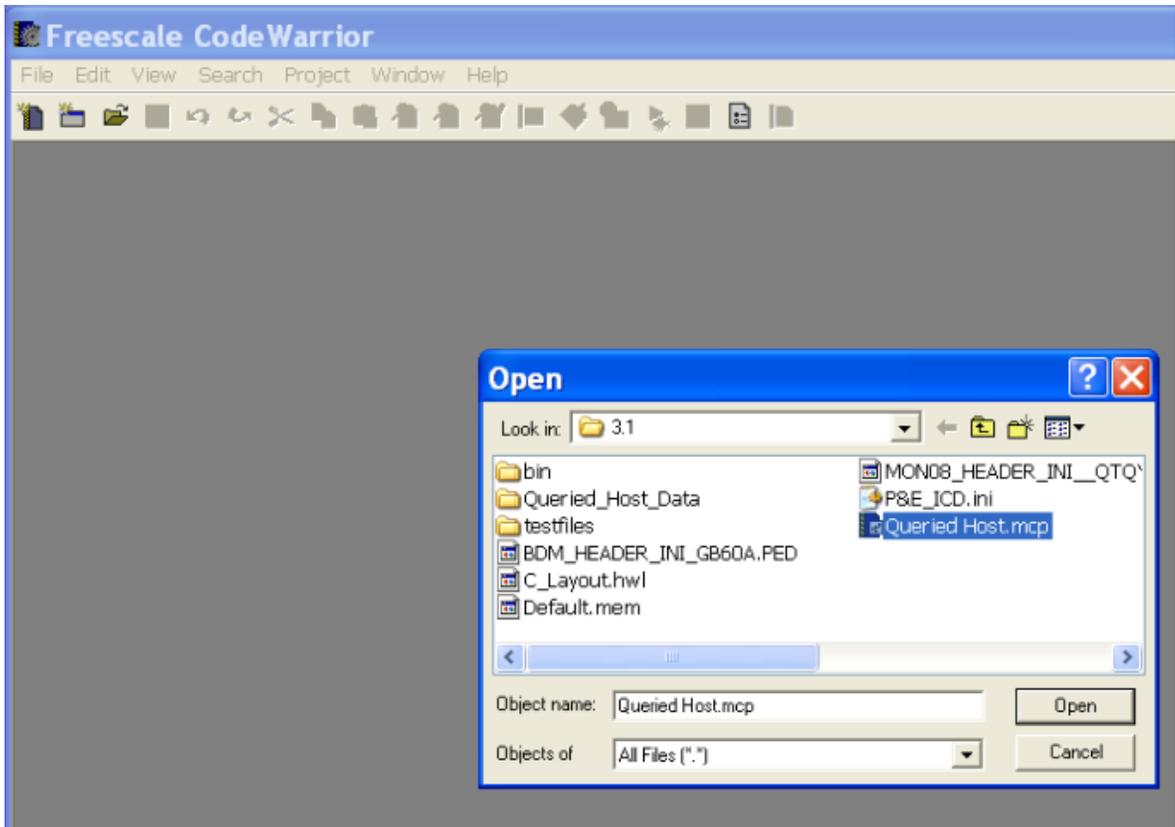
4.1 Compilación de SMAC 4.1 sobre Freescale Codewarrior 5.0

Después de modificar las fuentes de SMAC acorde con lo que se necesita para programar cada Nodo, se separó en carpetas diferentes cada aplicación a fin de tratar ordenadamente la compilación. El proceso se repite para cada aplicación que se desee compilar y posteriormente programar.

Primero se abre Freescale Codewarrior 5.0. Asumimos que la licencia que el usuario tiene es de funcionalidad completa, pues en licencias limitadas sólo se permite compilar y construir los archivos en lenguaje de máquina, mas no programar más de 1k de código.

Después, se abre el menú "File", opción "Open". Lo que se debe abrir para permitir la compilación de las fuentes y la aplicación, es el Proyecto completo, un archivo de extensión ".mcp" el cual llama ordenadamente los archivos. La pantalla que se aparece a los ojos inmediatamente se presiona "Open", puede observarse en Figura 59.

Figura 59. Pantalla de Apertura de archivos en Freescale Codewarrior 5.0



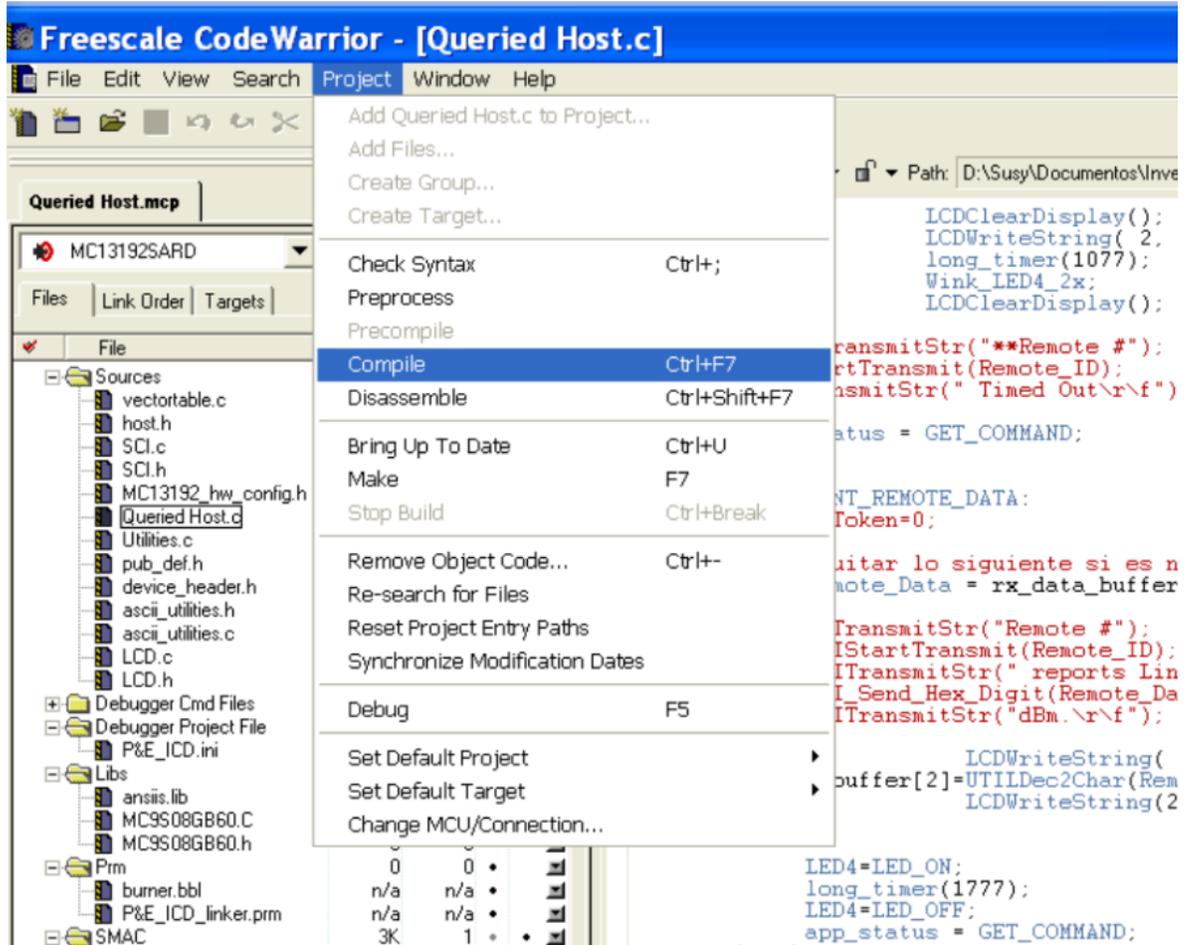
Fuente: Freescale Codewarrior 5.0

Aquí, se abrirá la estructura del proyecto. Puede tenerse acceso a cualquier archivo que esté ligado al proyecto. Suele ser recomendable modificar hasta donde sea posible, todo desde el programa principal de la aplicación, aunque pueden ser necesarias algunas modificaciones de fondo.

Después de hacer las modificaciones necesarias, para comprobar si hubo algún errores de sintaxis, se procede a

intentar compilar el proyecto. Para esto, se vá al menú "Project", y la opción "Compile", como se vé en Figura 60.

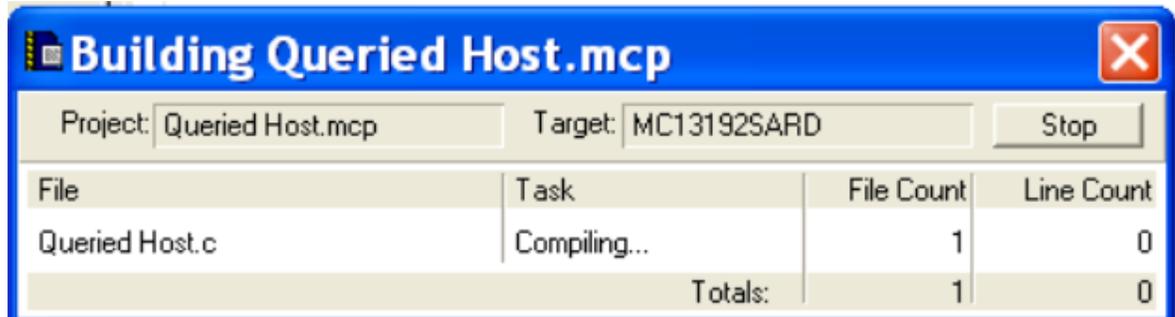
Figura 60. Comando desde donde se llama a la compilación



Fuente: Freescale Codewarrior 5.0

Aparecerá un mensaje donde se muestra qué archivo se está compilando en el momento, que puede observarse en Figura Wee3. En caso de que la compilación sea exitosa, Codewarrior 5.0 no suele arrojar avisos, y el mensaje en Figura 61 simplemente desaparece.

Figura 61. Mensaje de status del proceso de compilación



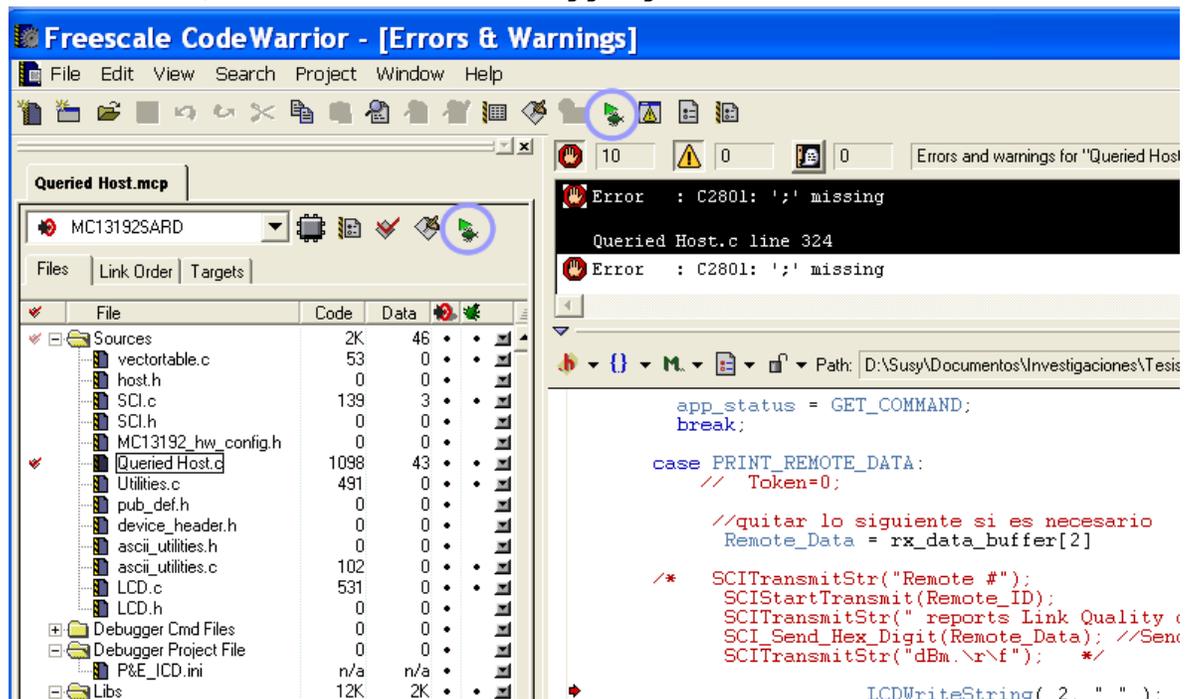
Fuente: Freescale Codewarrior 5.0

Sin embargo, en caso de que haya algún error de sintaxis que detecte el compilador, éste suele arrojar al final de la compilación, un reporte donde indica qué línea (o líneas) en qué archivo(s) presentan problemas en ajustarse a los lineamientos del compilador, y suele asignar un código de error para cada tipo de falla, como se observa en Figura Wee4.

Cada uno de éstos códigos de error puede consultarse en la ayuda de Codewarrior con sólo hacer click en su identificación dentro del reporte, y la ayuda de Codewarrior ofrece algunas sugerencias para ayudar al programador a corregir los errores. Un ejemplo en Figura 62: se observa que el error es la ausencia de un ";" en alguna línea del archivo "Queried_Host.c".

El problema, es que la línea que nos dice el reporte, no parece tener este problema; pero mirando con más cuidado, se observa que hasta ahí llega la línea con código válido inmediatamente anterior, donde se asigna un valor a la variable "Remote_Data", y allí hace falta un ";".

Figura 62. Reporte de Errores de Compilación/ enmarcado en color lila, el botón de "debugging"



Fuente: Freescale Codewarrior 5.0

Por ésta razón, cuando haya errores similares, no se debe mirar sólo en el renglón que apunta el compilador, sino que es también en la línea de código válida inmediatamente anterior a la señalada (observar que hay varias líneas de

código, pero están entre signos de comentarios, así que no son válidas).

4.2 Programación de los Módulos RF con la Aplicación final compilada

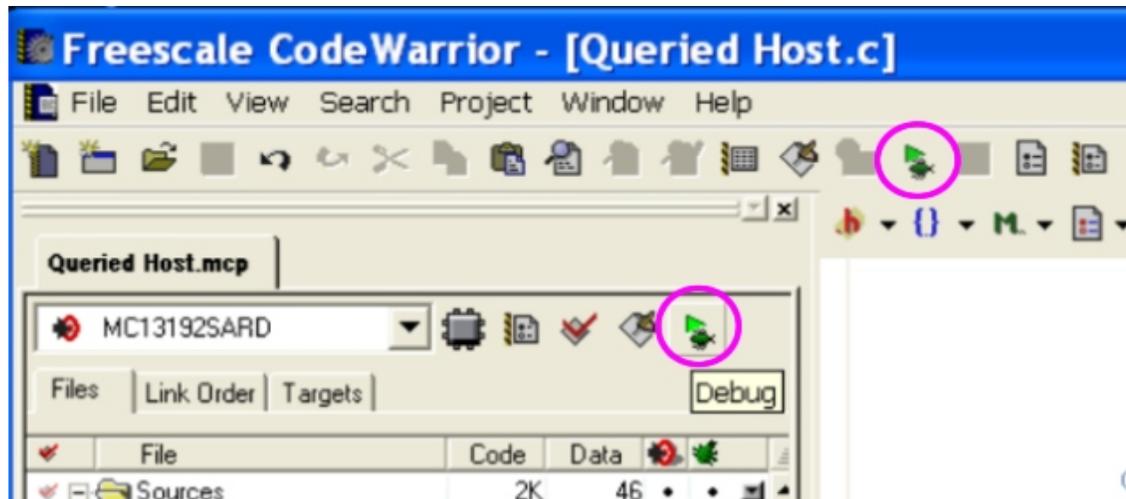
Después de compilado el proyecto, se procede a hacer "debugging", que puede hacerse simulado, o programando el comportamiento del dispositivo sobre los módulos. Si se desea ver cómo funciona la red en conjunto, es mejor la segunda para apreciar los comportamientos de todos los nodos en paralelo. Para programar, se hace click en cualquiera de los íconos de Debug en la interfaz de Codewarrior.

En Figura 62, y más cerca en Figura 63, se puede observar la ubicación de éstos íconos de debugging, encerrada en aros de color (sección anterior). Una vez se hace click en los mismos, un mensaje similar al de compilación aparece.

De hecho, se hace una verificación de fechas en de los archivos; esto lo hace Codewarrior para proteger sus licencias de ser usadas por más tiempo del debido. Si la fecha de compilación del registro de un proyecto es posterior

a la fecha del sistema, arroja un mensaje: "Error: The clock has been set back", y se cierra el programa.

Figura 63. Ubicación de los botones de "Debug" enmarcados en fucsia, desde donde se pueden programar los módulos

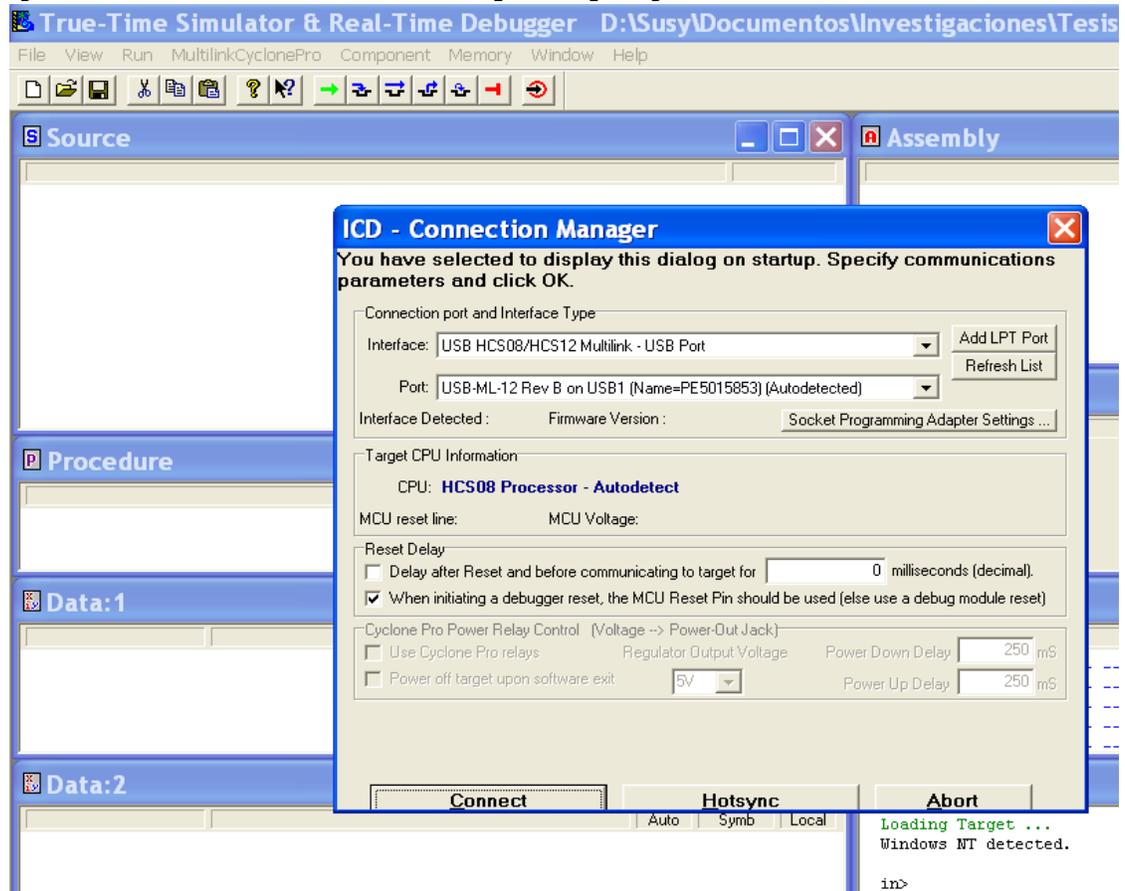


Fuente: Freescale Codewarrior 5.0

Luego el proyecto completo se recompila (para chequear por cambios que puedan generar errores), se reconstruye, y se hace el enlazamiento (linking). Si está correcto, se activará el HIWAVE (el programa que hace debugging).

Si la opción de "Programming" está activa y configurada para el Microcontrolador que se programará, aparecerá el menú que puede apreciarse en Figura 64. En él se observa el status de las tarjetas a programarse y se selecciona el puerto y la interfaz por donde se programará al Uc que está en el módulo.

Figura 64. Interfaz HIWAVE para programar al Uc



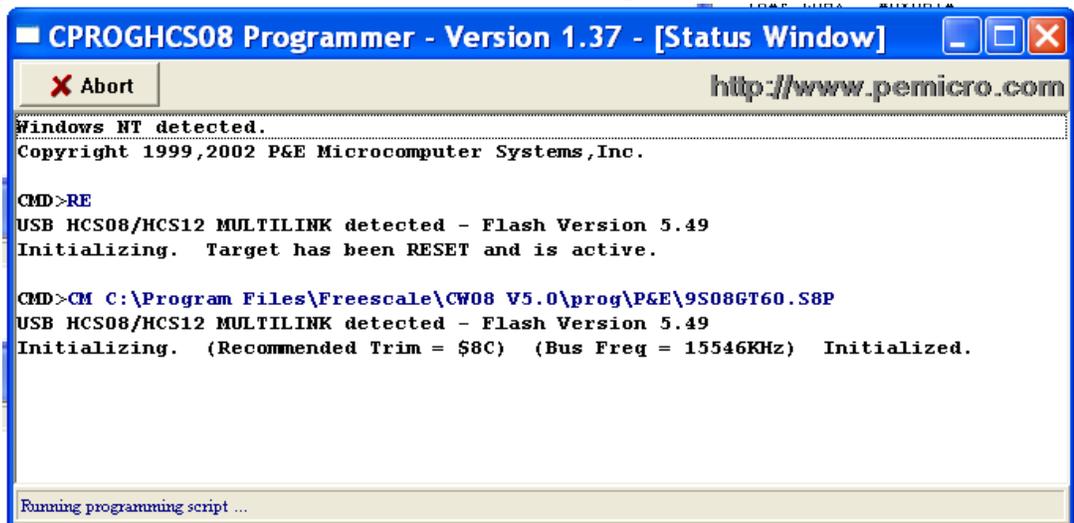
Fuente: Freescale Codewarrior 5.0

Después de presionar el botón "Connect", si el hardware está adecuadamente conectado, aparecerá una consola como aquella en Figura 65, donde se muestran al usuario mensajes indicando los procesos que se están llevando a cabo para programar al Módulo.

Al terminar, a menos que el módulo tenga restricciones que no permitan escribir en la Flash, debe estar programado.

Después, se debe hacer un reset del hardware para correr adecuadamente el programa que acabamos de "quemar" en la flash. Se recomienda desconectar la interfaz de programación en caso de que estemos usando alguno de sus puertos (que son compartidos con puertos de propósito general) en nuestra aplicación.

Figura 65. Consola de información, proceso de programación



```
■ CPROGHCS08 Programmer - Version 1.37 - [Status Window]
X Abort http://www.pemicro.com
Windows NT detected.
Copyright 1999,2002 P&E Microcomputer Systems,Inc.

CMD>RE
USB HCS08/HCS12 MULTILINK detected - Flash Version 5.49
Initializing. Target has been RESET and is active.

CMD>CM C:\Program Files\Freescale\CW08 V5.0\prog\P&E\9S08GT60.S8P
USB HCS08/HCS12 MULTILINK detected - Flash Version 5.49
Initializing. (Recommended Trim = $8C) (Bus Freq = 15546KHz) Initialized.

Running programming script ...
```

Fuente: Freescale Codewarrior 5.0

El Hardware que se *recomienda* para programar (pues también puede programarse a través de un conector RS-232 al puerto serial del computador, siempre que exista ya el Embedded Bootloader en la Flash del Microcontrolador que usualmente viene de fábrica), por sencillez y flexibilidad, es el cable BDM Multilink de P&E, el cual se conecta a las terminales apropiadas[MC2]. El conector de éste cable, es del tipo Molex

P/N 1544-5806, o un conector standard hembra de 6 pines y 0.1" (2.54mm). Ver Figura 66.

El puerto del BDM está configurado, tanto para la SARD de Freescale como para la PAN802154HAR00 de Panasonic como se observa en Tabla 14.

Figura 66. Hardware empleado para programar los módulos RF



Fuente: [<http://www.pemicro.com/products/>]

Tabla 14. Función de cada pin en el cable Multilink empleado para programar los módulos RF

Hdr. Pin #	PIN NAME	Function	Remarks
J1-1	PTG0/BKG0	Serial Programming Line or General Purpose I/O	This line controls the loading of new program code to the MCU. Pin has 4.7K pull-up. After code is loaded, acts as digital I/O.
J1-2	GND	Ground	
J1-3	-	N/C	
J1-4	/RESET	Reset to MCU	Active-low reset
J1-5	-	N/C	
J1-6	VCC	Provides power to BDM debugger module	

Fuente: [Anexo A1, página 9]

Observar que puede usarse el Pin 0 del puerto G de propósito general, y se puede tener otra fuente (o salida) de alimentación en el módulo después de éste ser programado, así como controlar el reset del microcontrolador desde éste punto. Ésto pues el Pin 0 del puerto G comparte la función de Background Debug Mode (BDM) del microcontrolador, que permite modificar la flash del mismo desde éste puerto.

4.3 Dificultades resueltas en el momento de la implementación.

A. La Primera Dificultad que se tuvo en la implementación, fué que los Nodos Panasonic no permitían la escritura sobre la flash: estaba restringida de fábrica. En caso de estar restringida la flash del Microcontrolador, se recomienda descargar la herramienta "Test Tools" del sitio Web de Freescale, y programarlo con cualquier otro .s19 desde esta aplicación, en vez de Codewarrior. Test Tools, después de reconocer la plataforma BDM que se use para modificar la Flash, remueve cualquier restricción existente en el Microcontrolador, y permitirá entonces re-programarlo normalmente desde Codewarrior.

Para mayor información sobre cómo usar éste programa, consultar la documentación de ayuda de "Test Tools".

B. La Segunda Dificultad que se tuvo fué obtener los intervalos de RX_ON y RX_OFF, tal que hubiera una buena comunicación, reflejada en indicadores satisfactorios de éxito satisfactorios. A pesar de que los intervalos seleccionados inicialmente, teóricamente eran suficientes para que se encendiera y apagara dos veces un nodo sensor mientras el Sink estuviera en espera, no eran suficientes para alcanzar una relación de solicitudes emitidas Vs atendidas que se considerara satisfactoria. Se hicieron una serie de ajustes manuales, que eventualmente doblaron el tiempo que duraba este nodo sensor con RX_ON con cada período, y la comunicación mejoró notoriamente, de una manera que se describe en la sección de Resultados.

C. Otra cosa importante, aunque no difícil consistió en mantener aislado al microcontrolador en el nodo, de la batería del automóvil -alimenta el Relay como tal-, para evitar ruidos. Es válido mencionar que también fué difícil conseguir un fusible quemado de éste tipo para colocar en el Slot y conectar la tarjeta al mismo.

5. Resultados y Observaciones

En esta sección se consignan resultados cuantitativos a pruebas de rendimiento del sistema construido. Estas pruebas se enfocaron a adquirir información con la cual se determinó si la congruencia del sistema con los indicadores de éxito.

5.1 Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas

Para traducir los comportamientos en la Sección 2.2 a porcentajes de Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas, se programó cada nodo con el comportamiento correspondiente al Rol que cada uno cumpliría en el sistema, y se instalaron en los lugares físicos del automóvil en donde cumplirán su función. Posteriormente, se hicieron 50 queries manuales para cada nodo a través del Sink; el query de cada nodo se hacía intercalado (es decir, en el intento #1 de comunicación se hacía para los 4 nodos, luego el intento #2, y así). Cada vez que un nodo respondía a la petición del Sink, se sumaba un punto a la cantidad "Solicitudes Atendidas por Nodo".

Se emplearon distintos *Duty Cycles* para los nodos distintos al Sink: Con un T_{Off} del Radio de 1s, se tiene al primer *Duty Cycle* de 0.7% con 7ms de T_{ON}; el segundo, es un *Duty Cycle* del 1.2% con 12ms de T_{ON}. Así se obtuvo Tabla 15 y 16.

Tabla 15. Relación de Solicitudes Atendidas por Nodo a las Emitidas por el Sink para un *Duty Cycle* del 0.7% (tiempo de vida estimado con baterías AAA, aprox. 8 meses, 2 semanas)

Nodo	Solicitudes Emitidas por Sink	Solicitudes Atendidas por Nodo	SA/SE %
Fusible (1)	50	38	<u>76%</u>
S2 (2)	50	44	<u>88%</u>
F2 (3)	50	36	<u>72%</u>
S1 (4)	50	39	<u>78%</u>

Tabla 16. Relación de Solicitudes Atendidas por Nodo a las Emitidas por el Sink para un *Duty Cycle* del 1.2% (tiempo de vida estimado con baterías AAA, aprox. 5 meses)

Nodo	Solicitudes Emitidas por Sink	Solicitudes Atendidas por Nodo	SA/SE %
Fusible (1)	50	50	<u>100%</u>
S2 (2)	50	50	<u>100%</u>
F2 (3)	50	48	<u>96%</u>
S1 (4)	50	49	<u>98%</u>

Acorde con los resultados en Tabla 15, el nodo con el que se tuvo la mejor Relación de Solicitudes Atendidas Vs Emitidas, fué el Nodo S2 (Aquel que contiene al Acelerómetro), y el que tuvo la menor, fué el Nodo F2 (el que estará fuera del automóvil tomando temperatura exterior) con una diferencia de el 16% entre el que tuvo la mayor y menor relación. Pero algo

curioso ocurre en Tabla 16: A pesar que la mayor relación siguió teniéndola el Nodo S2 -en esta ocasión junto con el Nodo Fusible1-, y la menor el Nodo F2, la diferencia está muchísimo menos marcada, pues bajó al 4%.

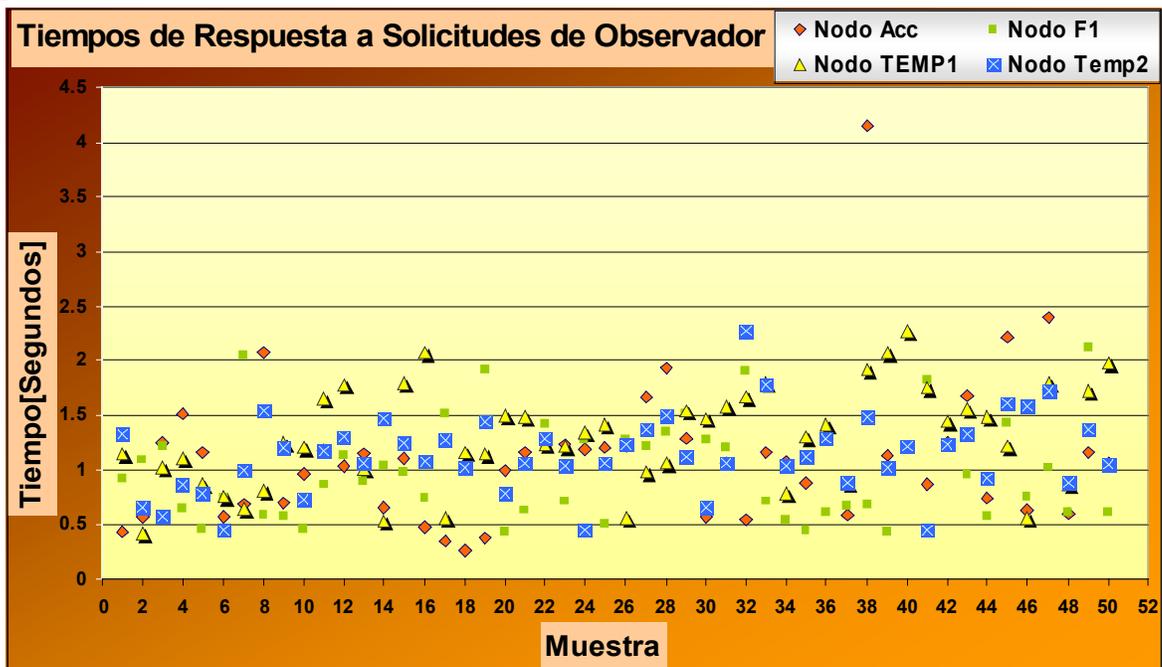
El hecho de que hayan solicitudes de observador sin ser atendidas, se debe a varios factores, entre ellos están: las interferencias del medio, si el momento en que se envió el mensaje efectivamente estaba habilitado el nodo hacia el cual el nodo *Sink* envió mensaje, y la alineación de las antenas unas con otras, cuyos efectos son regidos por el patrón de Radiación de la Antena.

También, como los nodos *Sink* y S2 inevitablemente serán movidos y rotados a diversas posiciones por el usuario, ésta relación de Solicitudes Atendidas vs Emitidas puede variar de acuerdo con la posición en que estén, siendo especialmente crítica la posición del nodo *Sink* con respecto a los otros nodos (el patrón de Radiación de la antena en nodo *Sink* es similar a aquellas de una SARD en la sección 2.3, al ser este nodo una tarjeta SARD).

5.2 Tiempos máximos, mínimos y promedio de respuesta para Solicitudes de observador atendidas, para cada Nodo

A continuación, se midieron los tiempos de respuesta de cada nodo, para 50 solicitudes de observador atendidas. Los resultados se contemplan en Figura 67.

Figura 67. Tiempos de Respuesta a solicitudes de Observador para cada Nodo

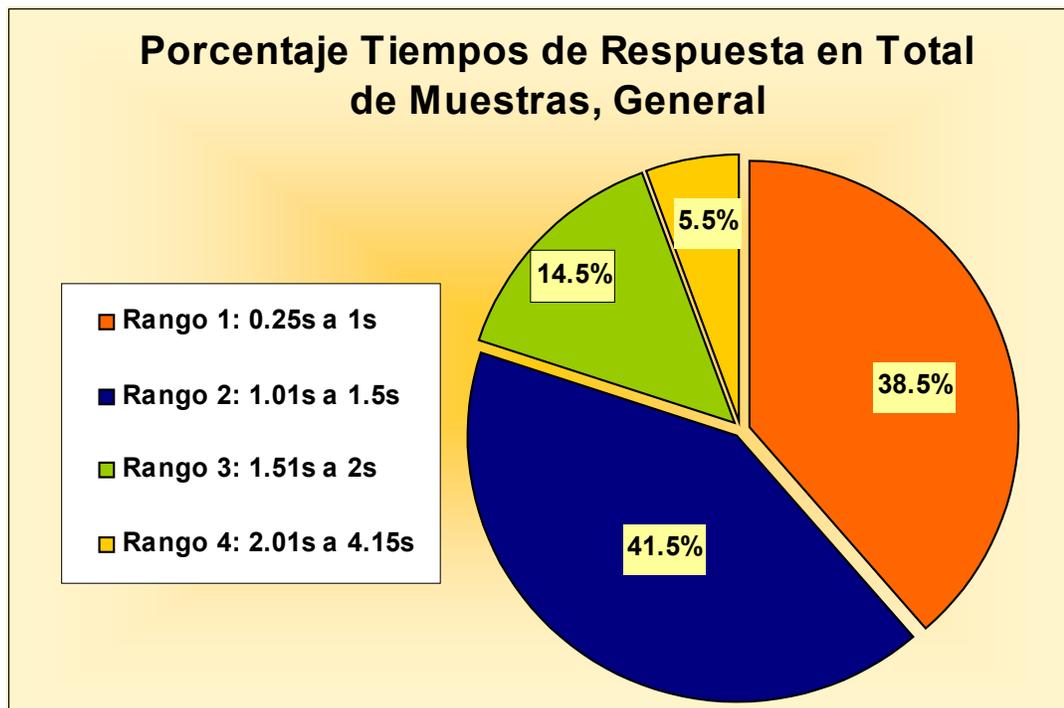


Obtenida con: Microsoft Excel.

Observar en Figura 67, que la densidad de estos puntos es mayor entre 0.5s y 1.5s de tiempo de respuesta. Para

visualizar ésta información más detalladamente, se dividieron los tiempos de respuesta en rangos. Y a partir de la cantidad de muestras por rango (50 por cada nodo, 4 nodos, produce un universo de 200 muestras en total), se obtuvo el porcentaje total de muestras por rango. Esta información se visualiza en Figura 68.

Figura 68. Porcentajes del Total de Muestras, para rangos de Tiempos de respuesta



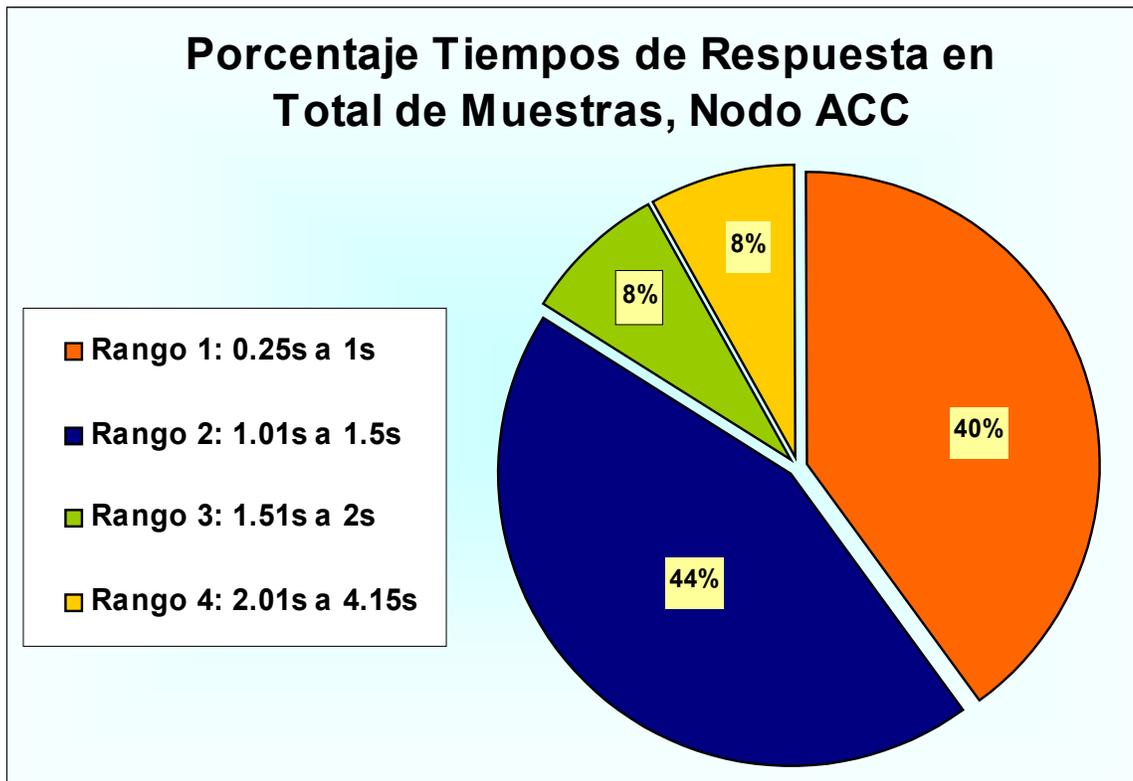
Obtenida con: Microsoft Excel.

En Figura 68 también se incluyen los Rangos. Se observa que la mayoría de respuestas, en general, tardaron entre 1.01s y 1.5s en hacerse efectivas, seguida de cerca por las que

tardaron entre 0.25s y 1s.

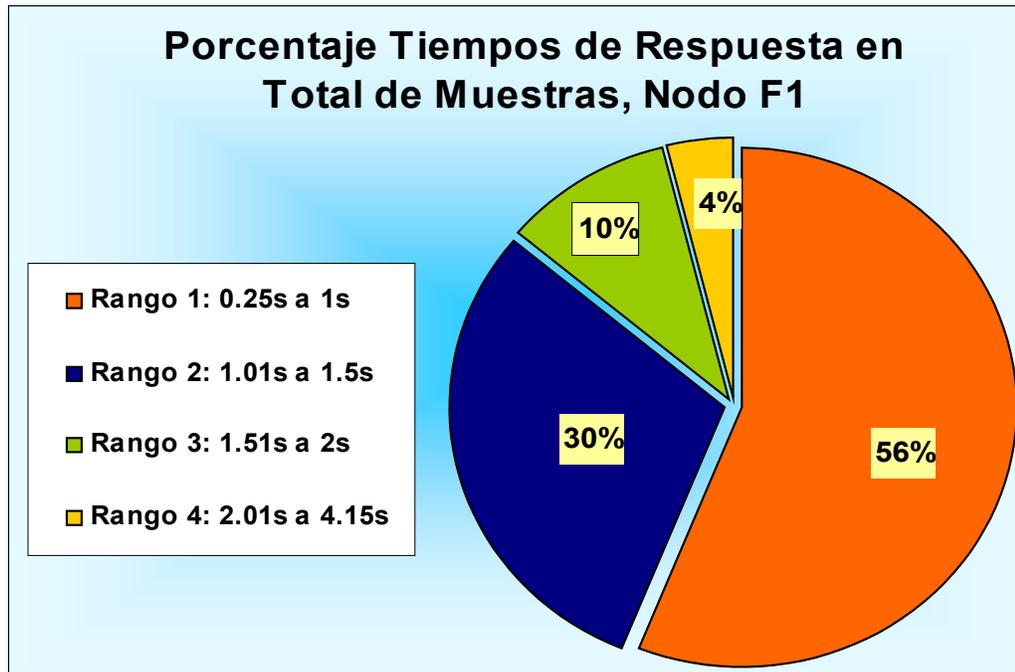
A continuación, se muestra la misma información, pero para cada nodo. En Figura 69 se muestra la información para el Nodo ACC, en Figura 70 para el Nodo Relay (F1), en Figura 71 para el Nodo Sensor de Temperatura del Motor (TEMP1) y en Figura 72, para el Nodo Sensor de Temperatura Exterior (TEMP2).

Figura 69. Porcentajes de los tiempos de respuestas en el total de muestras tomadas para el Nodo ACC



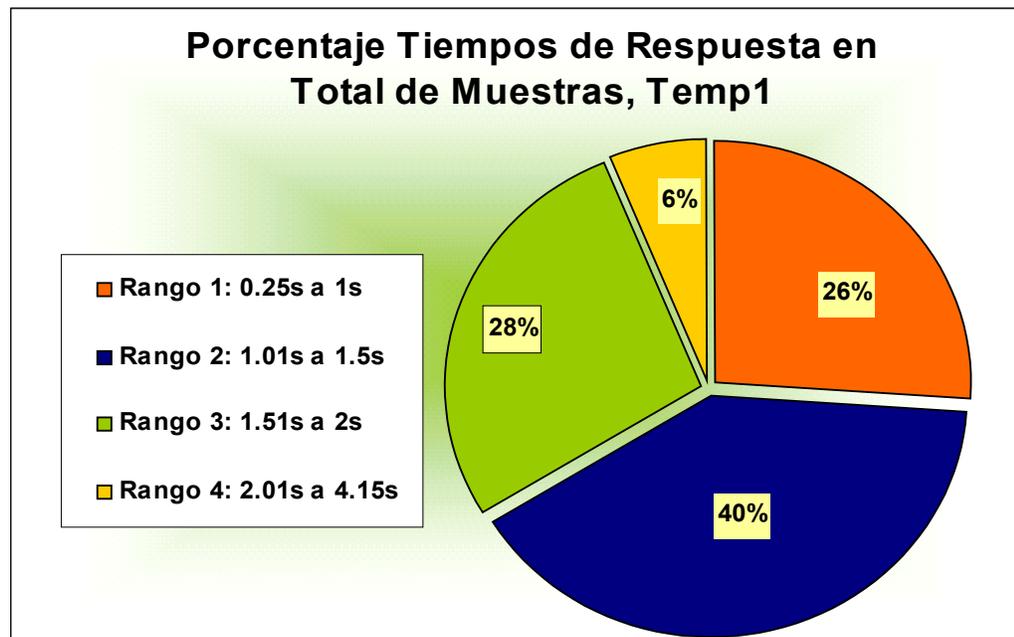
Obtenida con: Microsoft Excel

Figura 70. Porcentajes de los tiempos de respuestas en el total de muestras tomadas para el Nodo Relay (F1)



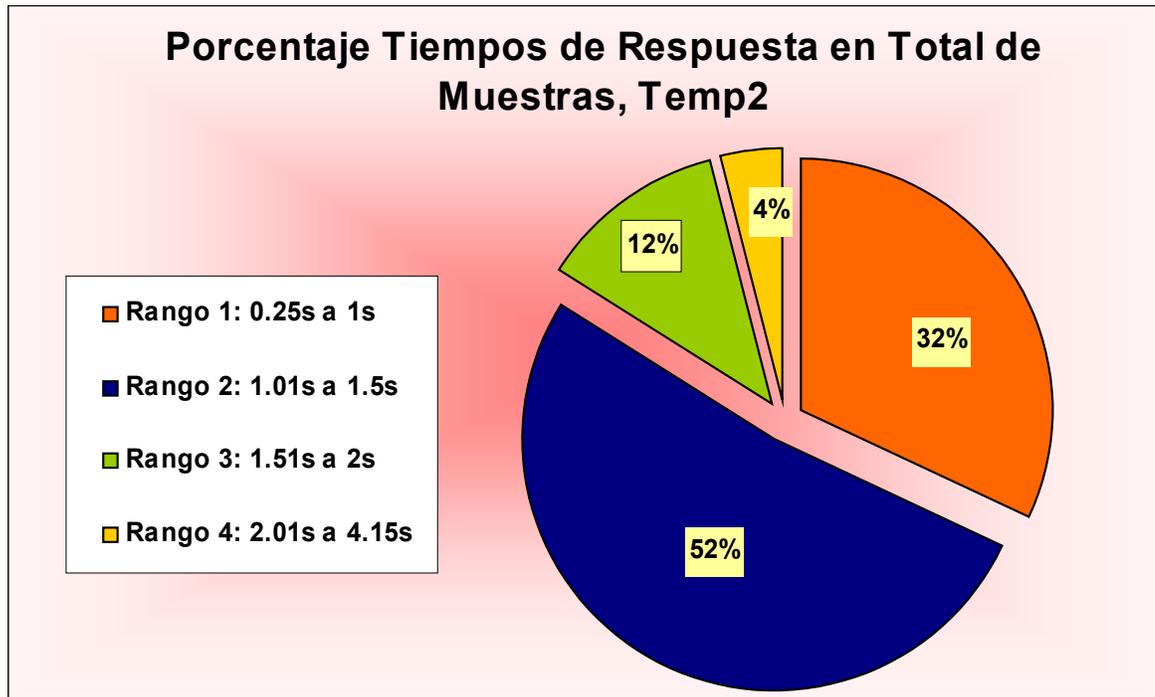
Obtenida con: Microsoft Excel

Figura 71. Porcentajes de los tiempos de respuestas en el total de muestras tomadas para el Nodo (TEMP1)



Obtenida con: Microsoft Excel

Figura 72. Porcentajes de los tiempos de respuestas en el total de muestras tomadas para el Nodo (TEMP2)



Obtenida con: Microsoft Excel

De todos, el nodo que más frecuentemente tenía respuestas rápidas (Rango 1) era el Nodo F1, y el que más frecuentemente tenía respuestas lentas (Rango 4) era el Nodo Sensor de Temperatura del Motor (TEMP1).

6. Conclusiones y Recomendaciones

Acorde con el objetivo principal de éste trabajo, se construyó una Red Inalámbrica de Sensores en un automóvil con un sencillo protocolo de red. En este diseño se tuvo en cuenta tanto la duración de la batería, como la tolerancia a latencias de segundos en la comunicación entre nodos, con los siguientes resultados:

- Los porcentajes de Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas estuvieron entre el 96% y el 100% para un *duty cycle* del 1.2%.
- Los tiempos máximos de respuesta a Observador en Solicitudes Atendidas no fueron mayores a 4.15 segundos, aunque la mayoría de ocasiones estaban entre 0.25s y 1.5s.

Estas cifras demuestran que son válidos los supuestos teóricos tras esta implementación, pues a través de éstos se construyó el sistema con el rendimiento señalado.

Para aumentar duración de batería, una estrategia sencilla que resultó efectiva fué usar ciclos de actividad (*Duty Cycles*) en el encendido del Radio y el Microcontrolador; sin

embargo, esto indudablemente afectó la relación de Solicitudes Atendidas Vs Emitidas por Nodo Sink, y por ende lo confiable del sistema. Debido a lo crítico de confiar en el sistema para que el automóvil pueda andar, fué necesario sacrificar tiempo de vida por confiabilidad, pero balanceando estos factores tal que el tiempo de vida estimado de un nodo, supera los 3 meses establecidos.

Aumentar a casi el doble el tiempo que dura un Nodo en modo Rx, de un valor inicial de 7 ms, a un valor de 12ms de RX_ON, aumenta también el porcentaje de Solicitudes Atendidas / Solicitudes Emitidas por Nodo Sink, de entre 72% y 88%, a entre el 96% y el 100%. Sin embargo, esto puede disminuir su tiempo de vida estimado en un 42.9%.

En el caso de querer convertir éste trabajo en un producto comercial, el indicador de Solicitudes de Observador Atendidas Vs Emitidas debe ser mejorado. Una manera de hacerlo es ampliar el tiempo que duran encendidos los nodos distintos al Sink en modo Rx a un valor más óptimo y respetuoso de la duración de batería. Otra sería estudiar la manera de disponer los nodos en el espacio para aprovechar las características de los patrones de radiación de las antenas.

Una recomendación para mejorar globalmente los indicadores de rendimiento en éste trabajo, es estudiar el efecto que tienen las pérdidas por conmutación sobre la duración de las baterías, particularmente aquellas que se dan durante el cambio de estados de normal a bajo consumo en radio y microcontrolador, y tener en cuenta estos efectos en unas estimaciones más realistas sobre el comportamiento de las mismas, ante cualquier protocolo que se implemente sobre éste hardware. Así, se podrá manejar un equilibrio entre pérdidas por conmutación, y pérdidas por permanecer en estado RX_ON.

Otra forma de mejorar el rendimiento del sistema (tanto de los tiempos de latencias, como en el uso de la energía) es mediante la optimización del protocolo a las condiciones del medio del automóvil. Esto implicaría modelar las características del enlace de cada nodo dentro del automóvil con el Nodo Sink, y en base a éste modelo, planear una estrategia para mejorar la tasa de Solicitudes Emitidas por el Sink vs Atendidas por parte de los Nodos.

Finalmente se debe mejorar la discriminación en lo referente a la operación de sensado de los movimientos de la cabeza, con el fin de hacer eficiente ésta herramienta, permitiendo que sea adaptada a cada usuario.

7. Posibles Trabajos Futuros en los cuales evolucionar éste sistema

Este sistema podría evolucionar en varios posibles trabajos futuros. Uno muy interesante (pero que requeriría participación de entidades externas), sería crecer el número de variables sensadas, incluyendo variables como temperatura y presión de las llantas, presión del agua en la manguera del motor, detección de inclinación, etc, e integrar esta "intranet de sensores" con la recientemente liberada Suite de IEEE Standards 1609 (WAVE)*.

Podrían adaptarse más actuadores, que permitieran un mayor control del vehículo por cuenta de una mayor inteligencia que los controlaría.

El trabajo más inmediato que se está forjando, es crecer la plataforma a una herramienta más general: en éste trabajo se describió una red inalámbrica con sensores y actuadores que se adaptó a la aplicación concreta de un automóvil, y se evaluó el desempeño de los comportamientos programados de cada Nodo, pero así también podría adaptarse a otras

* [Http://www.ieee.org/theinstitute](http://www.ieee.org/theinstitute) Vol.31 No1, "Standards for Car Talk".

aplicaciones donde sea viable emplear ésta herramienta. Una evolución de éste proyecto es converger ésta tecnología, con otros dispositivos. La opción más inmediata, sería con un SmartPhone o a un PDA, y entonces podría pensarse en una solución flexible, y ubicua, y con la comodidad de la convergencia de servicios de comunicaciones de hoy en día, pueden permitirse a un usuario tener la información de sus mediciones en cualquier parte, y en cualquier momento.

Para trabajos futuros a nivel de posgrado, se propone estudiar otras funcionalidades como programación remota y auto-medición del estado de las baterías, y también a la hora de diseñar, unas estimaciones más precisas de la duración de baterías en la red acorde con el tráfico, y un protocolo de red que aprenda a modificar la topología de la red acorde con la calidad de los enlaces y otros criterios (un rigor matemático superior en el diseño del protocolo de red [ILY Sección VII, Capítulo 28, Sección IV, Sección 18.4 y 18.5]), entre otras opciones.

Bibliografía

- [TEN] Asmussen, A., Rodriguez, R., Roshak, L. - Freescale Semiconductor inc., "**MC1319x Range Performance**", Rev 1.2, Octubre de 2005. 14p.:il.
- [BOS] BOSCH, "**Bosch Type Relay Wiring Diagrams**".
- [DAE] Daewoo Motor co., LTD., "**Lanos Electrical Wiring Diagram**", Korea, 1997. 280p.
- [DUT] Dutta, P., Grimmer, M., Arora, A., Bibyk, S., Culler, D., "**Design of a Wireless Sensor Network Platform for Detecting Rare, Random, and Ephemeral Events**", Memorias del (Proceedings of the) IPSN 2005, Los Angeles, California, (Abril 2005).
- [TEL] Fragoso, U., "**IEEE802.5 (Token Ring) e IEEE802.2 (LLC)**", Diapositivas 11 y 12. Mayo de 1998. Enlace Web:
<http://ftp.itam.mx/pub/academico/maestria/www/mtia/telematica/802.5/tsld012.htm>
- [MC1] Freescale Semiconductor inc., "**MC13192/MC13193: 2.4 GHz Low Power Transceiver for the IEEE® 802.15.4 Standard - Technical Data**", Rev 2.9, Agosto de 2005. 24p.:il.
- [MC2] Freescale Semiconductor inc., "**HCS08 Microcontrollers (MC9S08GT60) Datasheet**", Rev 2.3, Diciembre de 2004. 290p.:il.
- [HEI] Heinzelman, W., "**Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks**", Tesis de Grado, Junio de 2000.
- [STD] IEEE-SA (Standards Association) Standards Board, "**Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)**", New York, USA, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Octubre de 2003. 670p.:il. (STD IEEE 802.15.4)
- [ILY] Ilyas, M., Mahgoub, I., "**Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems**", Primera Edición, Boca Ratón, Fl.(USA), 2005,

773p.:il. (ISBN 0-8493-1968-4).

- [KUL] *Kulkarni, S., Iyer, A., Rosenberg, C., "An Address-Light, Integrated MAC and Routing Protocol for Wireless Sensor Networks", En: IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 14, No. 4, (Agosto 2006). (ISSN 1063-6692)*
- [LEE] *Lee, J. M., Zheng, J., Hu, X., Hsin-hui, J., Zhu, C., Liu, Y., Yoon, J., Saadawi, T., "A New Taxonomy of Routing Algorithms for Wireless Mobile Ad Hoc Networks: The Component Approach", En: IEEE Communications Magazine, Vol. 44, No. 11, (Noviembre 2006). (ISSN 0163-6804)*
- [MAY] *Mayné, J., "Zigbee y 802.15.4", Revisión 0.0.*
- [POT] *Pottie, J., Kaiser, J.W., "Embedding the Internet Wireless Integrated Network Sensors", En: Communications of The ACM, Vol. 43, No. 5, (Mayo de 2005).*
- [SER] *Servetto, S., "From sensor Networks to Sensor Networks", En: Proceedings of the Third IEEE Workshop on Embedded Network Sensors (EmNetS) 2006, Cambridge, Massachusetts, (Mayo 2006).*
- [SIL] *Silva, L., Martínez, J., "Considerations on Designing WSN Running over Embedded Systems", En: Memorias del V Congreso Internacional de Electrónica y Tecnologías de Avanzada (CIETA) 2006, Pamplona, Norte de Santander, (Septiembre 2006).*
- [FR2] *Stuart, R., "Creating Efficient C Code for the MC68HC08": Application Note AN2093, Freescale Semiconductor inc., 2004. 16p.*
- [TIL] *Tilak, S., Abu-Ghazaleh, N.B. and Heinzelman, W., "A Taxonomy of Wireless Microsensor Network Models", En: ACM Mobile Computer Communications Review (MC2R), Vol. 6, no. 2, (Abril 2002).*

ENLACES A RECURSOS DE INTERÉS

Enlaces a los *Websites* de los Fabricantes del Hardware:

- <http://www.freescale.com/>
- http://www.panasonic.com/industrial/components/pdf/zigbee_appnote_0705.pdf

Enlaces a Grupos de Investigación que trabajan en éste área:

- <http://sensorweb.mit.edu/publications.php>
- <http://crisp.ece.cornell.edu/>
- <http://www.ece.rochester.edu/~wheinzl/research.html>
- <http://compilers.cs.ucla.edu/emsoft05/>

Enlaces para Adquirir los Componentes Necesarios:

- <http://www.digikey.com>
- <http://www.embeddedworks.net/>

Enlaces a Journals:

- <http://portal.acm.org/>
- <http://ieeexplore.ieee.org/>

Anexos

ANEXO A1: DOCUMENTACIÓN MÓDULOS RF DE PANASONIC
(PAN802154HAR00) .

ANEXO A2: DOCUMENTACIÓN MÓDULOS RF DE FREESCALE (SARD) .

ANEXO A3: CARACTERÍSTICAS MINI RELAY BOSCH 0 332 209 150 Y
OTRAS SERIES, E INSTRUCTIVO DE BOSCH SOBRE USO DE RELAYS EN
APLICACIONES AUTOMOVILÍSTICAS .

ANEXO A4: DATASHEETS: OPTOACOPLADOR 4N35, DIODO 1N4004,
TERMISTOR RL2007-1723-103-SA, INTEGRADO LM61 .

ANEXO A5: ESPECIFICACIONES BATERÍAS EMPLEADAS EN PRUEBAS DE
TIEMPO DE DESCARGA DE BATERÍAS .

ANEXO A6: DATASHEET TRANSISTOR TIP41C .

ANEXO B. CÓDIGOS FUENTE DE CADA NODO

ANEXO C1. CÓDIGOS FUENTE INTERFAZ LCD, SENSOR DE TEMPERATURA
EN S1 Y SENSOR DE TEMPERATURA EN S2 .