

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



Optimización del protocolo de comunicación utilizado por la Red Inalámbrica de Sensores: Arquitectura Abierta CRTECMOTE

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura


Sofía Ortiz Argüello

2011

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
TRIBUNAL EVALUADOR

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

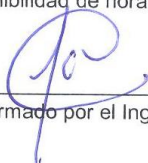

M.Sc. Carlos Badilla Corrales
Profesor lector


Ing. Johan Carvajal Godínez
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 29 de agosto de 2011.

**El Ing. Julio M. Stradi Granados es profesor lector del presente Proyecto de Graduación, pero no se pudo presentar el día de la presentación debido a que su disponibilidad de horario no se lo permitía.


Confirmado por el Ing. Johan Carvajal Godínez

Cartago, 29 de Agosto de 2011

Señores
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Biblioteca José Figueres Ferrer

Yo Sofía Ortiz Argüello carné 200532345, autorizo a la Biblioteca José Figueres del Instituto Tecnológico de Costa Rica disponer del Trabajo Final realizado por mi persona, con el título "*Optimización del protocolo de comunicación utilizado por la Red Inalámbrica de Sensores: Arquitectura Abierta CRTECMOTE*" para ser ubicado en la Biblioteca Digital y ser accesado a través de la red Internet.



Sofía Ortiz Argüello.
Cédula: 1-1329-0538

Resumen

Este documento describe el proceso de investigación y simulación de los protocolos de comunicación GSM y GPRS de telefonía celular, aplicados a la Red Inalámbrica de Sensores CRTECMOTE, con el fin de determinar la confiabilidad en la transmisión de datos desde el nodo sumidero hasta el nodo de almacenamiento, así como la reducción del costo económico de la transmisión que se puede lograr con el cambio de protocolo.

El protocolo GSM utilizado presenta limitaciones en la velocidad de transmisión de datos, lo cual limita los servicios que se pueden aprovechar para la transmisión de información por parte de la red CRTECMOTE. Esto crea la necesidad de buscar un nuevo protocolo que se puede utilizar con el mismo equipo de comunicación que dispone la WSN actualmente.

Por medio del uso de la herramienta OMNET++ se procede a simular distintos escenarios de aplicaciones reales de transmisión de datos en la red CRTECMOTE utilizando los protocolos GSM y GPRS, para determinar de manera teórica el rendimiento de cada protocolo. Se implementan todas las clases requeridas para reproducir las arquitecturas necesarias para la transmisión de información con ambos protocolos dentro de un plano espacial de simulación definido por la arquitectura celular dada por el ICE.

Los resultados obtenidos del proyecto muestran la mejoría en los factores de costo económico, complejidad de implementación sobre el hardware actual de la red CRTECMOTE, y confiabilidad en la transmisión de datos, al utilizar el protocolo GPRS. Esto es importante ya que proporciona seguridad y respaldo para decidir implementarlo físicamente en la red CRTECMOTE actual.

Palabras clave: Red Inalámbrica de Sensores (WSN), Protocolo de comunicación, GSM, GPRS, OMNET++ y Telefonía Celular.

Summary

This document describes the process of investigation and simulation of cell phone communication protocols GSM and GPRS applied to CRTECMOTE Wireless Sensor Network, in order to determine the reliability of data transmission from the sink node to storage node, and if reducing the economic cost of transmission can be achieved with the change of protocol.

The GSM protocol used has limitations on the speed of data transmission, which limits the services that can be exploited to transmit information from the network CRTECMOTE. This creates the need to seek a new protocol that can be used with the same communication hardware currently available to the WSN.

The tool OMNET++ is used to simulate real-world application scenarios for data transmission on the network CRTECMOTE using both GSM and GPRS protocols, to determine theoretically the performance of each protocol. All classes are implemented to reproduce the architecture required for the transmission of information with both protocols in a simulation spatially defined by the cellular architecture given by the ICE.

The project results show the improvement in economic cost, complexity of implementation on the current CRTECMOTE hardware, and reliability in data transmission using the GPRS protocol. This is important because it provides safety and support to decide to implement physically this new protocol in the CRTECMOTE network.

Keywords: Wireless Sensor Network (WSN), Communication Protocol, GSM, GPRS, OMNET++ and Cell phone Technology.

Agradecimiento

Primeramente deseo agradecer a mis padres por el constante apoyo, comprensión y atención que me han brindado siempre, y mucho más en mi desarrollo profesional. Les agradezco por el esfuerzo de ambos para brindarme la oportunidad de estudio y ayudarme a forjar una visión de vida integral.

Deseo agradecerle al Ing. Johan Carvajal Godínez por haberme brindado la oportunidad de participar dentro de sus proyectos de investigación desde el inicio hace más de dos años, por apoyarme siempre para alcanzar las metas, ofrecerme una guía e incentivar el desarrollo de mis habilidades profesionales.

Le agradezco de forma muy especial a mi novio Sebastián Badilla Carvajal, porque en el tiempo de realización del Proyecto, siempre me acompañó de la mano hasta lograr completarlo; me brindó su apoyo, guía y experiencias, lo cual fue muy valioso para mí en el desarrollo personal.

Gracias a todos aquellos que estuvieron involucrados de alguna u otra forma en la realización de este trabajo.

Índice General

Capítulo 1: Introducción 1

1.1.	Antecedentes.....	3
1.2.	Problema existente e importancia de su solución.....	4
1.2.1.	<i>Definición del problema</i>	4
1.2.2.	<i>Impacto económico</i>	6
1.2.3.	<i>Síntesis del problema</i>	7
1.2.4.	<i>Importancia de la solución</i>	7
1.3.	Solución seleccionada.....	7

Capítulo 2: Meta y Objetivos..... 9

2.1.	Meta.....	9
2.2.	Objetivo General.....	9
2.3.	Objetivos Específicos.....	9

Capítulo 3: Marco Teórico..... 10

3.1.	Descripción del sistema.....	10
3.2.	Descripción de los principales principios electrónicos relacionados con la solución del problema.....	14
3.2.1.	<i>Sistema Global para las comunicaciones Móviles (GSM)</i>	14
3.2.1.1.	Estándares de calidad GSM.....	16
3.2.1.2.	Arquitectura GSM.....	18
a.	Estación Móvil (MS).....	20
b.	Subsistema de Estación Base (BSS).....	20
c.	Subsistema de Conmutación y Red (NSS).....	21
d.	Subsistema de Operación y Soporte (OSS).....	22
3.2.2.	<i>Servicio de Mensajes Cortos (SMS), [12]</i>	23
3.2.3.	<i>General Packet Radio Service (GPRS)</i>	25
3.2.3.1.	Acceso a GPRS.....	26
3.2.3.2.	Arquitectura GPRS.....	27
a.	Unidad de Control de Paquetes (PCU).....	27
b.	Nodo de Soporte de Servicios GPRS (SGSN).....	28
c.	Nodo de Soporte Gateway GPRS (GGSN).....	28
d.	Domain Name Servers (DNS).....	29
e.	Firewalls.....	29
f.	Gateway Borde (BG).....	29
g.	Gateway de Cobro (CG).....	29
3.2.3.3.	Transferencia de paquetes GPRS.....	30
3.2.4.	<i>OMNET++</i>	31

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico 33

4.1.	Investigación y Diseño.....	33
4.1.1.	<i>Análisis teórico de las características de transmisión de datos de la red actual para una aplicación específica</i>	33
4.1.2.	<i>Selección del protocolo de comunicación que mejor se ajuste a las características del sistema</i>	33
4.2.	Implementación y desarrollo.....	33
4.2.1.	<i>Implementar el protocolo de comunicación seleccionado</i>	33

4.3.	Verificación de solución.....	34
4.3.1.	<i>Comprobación teórica de la transmisión de información como resultado de la implementación del nuevo protocolo de comunicación.</i>	34
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución		35
5.1.	Descripción general	35
5.2.	Análisis del sistema GSM por medio de OMNET++	36
5.2.1.	<i>Descripción de la implementación de las clases para GSM</i>	37
a.	Clase Mobile	37
b.	Clase AIR	40
c.	Clase ChannelControl	41
d.	Clase BTS	41
e.	Clase BSC	42
f.	Clase MSC	42
g.	Clase GSMSIM	43
5.2.2.	<i>Protocolo GSM simplificado implementado en la simulación</i>	43
5.3.	Implementación del protocolo GPRS por medio de OMNET++	46
5.3.1.	<i>Descripción de la implementación de las clases para GPRS</i>	46
a.	Clase SGSN.....	47
b.	Clase GGSN	47
c.	Clase GPRS_SIM.....	47
5.3.2.	<i>Protocolo GPRS simplificado implementado en la simulación</i>	48
5.4.	Escenarios de uso de una Red Inalámbrica CRTECMOTE.....	50
Capítulo 6: Análisis y resultados		53
6.1.	Resultados	53
6.1.1.	<i>Selección del nuevo protocolo de comunicación</i>	53
6.1.2.	<i>Parametrización de los escenarios de simulación del comportamiento de la red CRTECMOTE</i>	54
6.1.3.	<i>Resultados de simulación con OMNET++</i>	57
6.1.3.1.	Implementación del protocolo GSM	58
6.1.3.2.	Implementación del protocolo GPRS.....	61
6.1.3.3.	Síntesis de resultados de simulación de GSM y GPRS	64
6.1.3.4.	Resultados obtenidos de la potencia del enlace en GSM y GPRS	66
6.2.	Análisis de Resultados	68
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones		74
7.1.	Conclusiones.....	74
7.2.	Recomendaciones.....	75
Bibliografía.....		76
Apéndices		78
A.1.	Hoja de Información del Proyecto	78
A.2.	Interfaces entre sistemas para GSM, [6]	79
A.3.	Interfaces entre sistemas para GPRS	81

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Esquema general de la estructura y comunicación hacia el nodo de almacenamiento, [2].....	3
Figura 1. 2 Modelo de la base de datos relacional para el nodo de almacenamiento, [2].....	6
Figura 3. 1 Tres tipos de función para el nodo sumidero en una WSN sencilla, [3].....	11
Figura 3. 2 Nodo de enlace (gateway) en una WSN permitiendo comunicación e interacción con dispositivos fuera de la red, [3].	12
Figura 3. 3 Modelo de trabajo de la red CRTECMOTE.....	12
Figura 3. 4 USB EDGE Módem utilizado como equipo de transmisión de información en la red CRTECMOTE y hacia redes externas.....	13
Figura 3. 5 Elementos externos de la arquitectura funcional del sistema GSM.	19
Figura 3. 6 Arquitectura del sistema de celdas GSM.....	20
Figura 3. 7 Modelo de referencia de SMS simplificado, [12].	24
Figura 3. 8 Pila del protocolo SMS, [12].	24
Figura 3. 9 Arquitectura del sistema GPRS.....	27
Figura 3. 10 Diagrama de los paquetes del usuario enviados a través de la plataforma GPRS dentro de contenedores.....	30
Figura 3. 11 Características del contenedor GTP.	31
Figura 5. 1 Esquema de red GSM a implementar por OMNET++.....	37
Figura 5. 2 Módulos que conforman la clase Mobile.	37
Figura 5. 3 Selección de envío de mensaje inicial de solicitud de conexión.	38
Figura 5. 4 Selección de mensaje de respuesta según tipo de mensaje recibido.	39
Figura 5. 5 Asignación de mensajes en la interfaz AIR desde el MS al BTS.	40
Figura 5. 6 Asignación de mensajes en la interfaz AIR desde BTS al MS.....	40
Figura 5. 7 Tipos de mensajes utilizados para la simulación GSM con OMNET++.	43
Figura 5. 8 Protocolo de comunicación GSM implementado en la simulación con OMNET++.	45
Figura 5. 9 Esquema de red GPRS a implementar por OMNET++.	46
Figura 5. 10 Tipos de mensajes utilizados para la simulación GPRS con OMNET++.	48
Figura 5. 11 Protocolo de comunicación GPRS implementado en la simulación con OMNET++.	49
Figura 5. 12 Red CRTECMOTE de pequeña escala en topología estrella.	50
Figura 6. 1 Esquema de ubicación del Nodo CRTECMOTE en la provincia de Cartago.	55
Figura 6. 2 Visualización gráfica de la red con 500 usuarios generada por la simulación en OMNET++.	57
Figura 6. 3 Visualización gráfica de la red resultante GSM para pocos usuarios generada con OMNET++.	58
Figura 6. 4 Visualización gráfica de la red resultante GPRS para pocos usuarios generada con OMNET++.	61
Figura 6. 5 Representación gráfica del promedio de acceso general para cada escenario de aplicación con los protocolos GSM y GPRS.	65

Figura 6. 6 Representación gráfica del promedio de acceso del nodo CRTECMOTE para cada escenario de aplicación con los protocolos GSM y GPRS.	66
Figura 6. 7 Gráfica del comportamiento de la potencia del enlace para la BTS 0.	67
Figura 6. 8 Gráfica del comportamiento de la potencia del enlace para las BTS 1 y 2.	67
Figura 6. 9 Gráfica del comportamiento de la potencia del enlace para las BTS 3 y 4.	68
Figura A Diagrama de interfaces entre los elementos del sistema GSM.	80
Figura B Diagrama de interfaces entre elementos de la red GSM/GPRS.	81

Índice de Tablas

Tabla 3. 1 Radio frecuencias utilizadas en bandas GSM, [2].	15
Tabla 5. 1 Tabla comparativa de referencia para los escenarios de trabajo de la red CRTECMOTE.	52
Tabla 6. 1 Costos totales generados del uso de GSM y GPRS en los escenarios de comportamiento de la red CRTECMOTE.	54
Tabla 6. 2 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de carga baja para los dos casos de acceso a la red GSM.	58
Tabla 6. 3 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GSM en la aplicación de carga baja.	59
Tabla 6. 4 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de mediana escala para dos casos de acceso a la red GSM.	59
Tabla 6. 5 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GSM en la aplicación de mediana escala.	60
Tabla 6. 6 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de tiempo real para dos casos de acceso a la red GSM.	60
Tabla 6. 7 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GSM en la aplicación de tiempo real.	61
Tabla 6. 8 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de carga baja para los dos casos de acceso a la red GPRS.	62
Tabla 6. 9 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GPRS en la aplicación de carga baja.	62
Tabla 6. 10 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de mediana escala para dos casos de acceso a la red GPRS.	63
Tabla 6. 11 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GPRS en la aplicación de mediana escala.	63
Tabla 6. 12 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de tiempo real para dos casos de acceso a la red GPRS.	64
Tabla 6. 13 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GPRS en la aplicación de tiempo real.	64
Tabla 6. 14 Porcentajes promedio de llamadas completadas para cada escenario de aplicación con los protocolos GSM y GPRS.	65
Tabla 6. 15 Porcentajes promedio de llamadas completadas del nodo CRTECMOTE para cada escenario de aplicación con los protocolos GSM y GPRS.	66

Capítulo 1: Introducción

Las Redes Inalámbricas de Sensores (WSN, por sus siglas en inglés) para la protección del medio ambiente, surgen como área de investigación y desarrollo durante la última década gracias a los avances en la microelectrónica, la ingeniería de computadoras y las ciencias de los materiales.

La Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica, trabaja en el desarrollo de la Arquitectura Abierta CRTECMOTE, bajo la dirección del Profesor Ingeniero Johan Carvajal Godínez, la cual implementa el diseño y construcción de una Red Inalámbrica de Sensores, con el fin de generar dispositivos capaces de mitigar el impacto ambiental consecuencia de actividades productivas, especialmente agrícolas, mediante la monitorización y control de variables físicas en dichos procesos.

El desarrollo del hardware requerido para implementar un nodo para una Red Inalámbrica de Sensores responde a la aplicación del mismo. El diseño del nodo CRTECMOTE sigue un esquema de arquitectura jerárquica, donde se pueden reconocer cuatro subsistemas básicos: (i) bloque computacional (MCU), (ii) un bloque de comunicaciones, (iii) un bloque de sensado con la circuitería de acondicionamiento de señal y acople eléctrico para los sensores, y finalmente, (iv) un bloque encargado de suplir la energía que consume el nodo, [1].

El contexto del proyecto a desarrollar se ubica dentro del bloque de comunicaciones de la arquitectura CRTECMOTE. Dicho bloque toma en consideración el esquema de topología de red jerárquica, en la cual se le asigna la prioridad más alta al nodo de almacenamiento, luego a cada nodo sumidero y éste bajo la topología estrella, administra la jerarquía de la red del área local.

El bloque de comunicaciones desarrollado hasta al momento comprende la comunicación entre el nodo de almacenamiento, loadpoint, y el nodo sumidero, sink, utilizando para esto un módem GSM con capacidad para la operación del protocolo SMS, lo cual permite la utilización de la red de telefonía celular del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) para el tráfico de datos.

El desarrollo de la Arquitectura Abierta CRTECMOTE lleva dos años de trabajo, durante los cuales se han desarrollado varios de los bloques que componen una Red Inalámbrica de Sensores, siempre teniendo en cuenta las aplicaciones sobre las que trabajará la futura red. Uno de los proyectos más importantes en los que toma participación la creación la red CRTECMOTE, es el llamado Modelo de Gestión Ambiental para Acueductos Rurales y Red de Monitoreo de la Calidad del Agua, proyecto coordinado por el ITCR en la sede de San Carlos, en colaboración con la Universidad Nacional y la UNED.

Dicho proyecto incorpora el trabajo de CRTECMOTE para cubrir la inexistencia de un mecanismo de medición para la calidad del agua. La propuesta consiste en ubicar una Red Inalámbrica de Sensores para monitorear el estado del agua en distintos puntos de los ríos bajo estudio. La toma de variables físicas se debe llevar a cabo por medio de sensores ubicados en el caudal de los ríos, cuyas mediciones serán tomadas por un nodo cliente y retransmitidas hacia el nodo sumidero. Este último debe tomar los datos de cada nodo cliente y enviarlos en conjunto hacia el nodo de almacenamiento, donde se guarda la información para su posterior consulta y análisis.

Debido a las ubicaciones remotas donde estarían dispuestos los nodos y acorde a los propósitos del proyecto de investigación, se hace necesario que la Red Inalámbrica de Sensores permita un monitoreo eficiente de la calidad del agua, pero a la vez asegurando un costo reducido del sistema para optar por su escalabilidad dentro de otras sedes de trabajo. Además, es necesario que los componentes de la red sean fácilmente reemplazables y accesibles en el mercado, ya que por las localidades a trabajar, podrían ser afectados tanto por factores naturales como humanos.

El proyecto de la Arquitectura Abierta CRTECMOTE posee como objetivo crear un mínimo impacto en el ambiente, y además ser de bajo costo dentro de las aplicaciones que se seleccionan para el uso de la Red Inalámbrica de Sensores. Es por esto, que el desarrollo del proyecto de graduación propuesto, integrará soluciones enfocadas con el mismo objetivo, donde adicionalmente, se tomarán en consideración todos los factores y objetivos sobre los que trabaja el proyecto de investigación de CRTECMOTE.

1.1. Antecedentes

Actualmente, la comunicación entre los nodos sumidero y de almacenamiento trabaja transmitiendo los datos bajo el formato de mensajes de texto, un dato a la vez, y por medio de una aplicación que permite la centralización de la información, organizándola para su posterior uso por parte del usuario.

En la figura 1.1 se detalla el esquema general del sistema desarrollado previamente por el Ing. Dennis Rodríguez R., para la solución a la carencia en la infraestructura de un nodo central. El hardware para el nodo central comprende un sistema computacional con un sistema operativo capaz de soportar el sistema gestor de base de datos MySQL, sobre el cual se implementó el diseño de un modelo relacional de almacenamiento y estructuración de información.

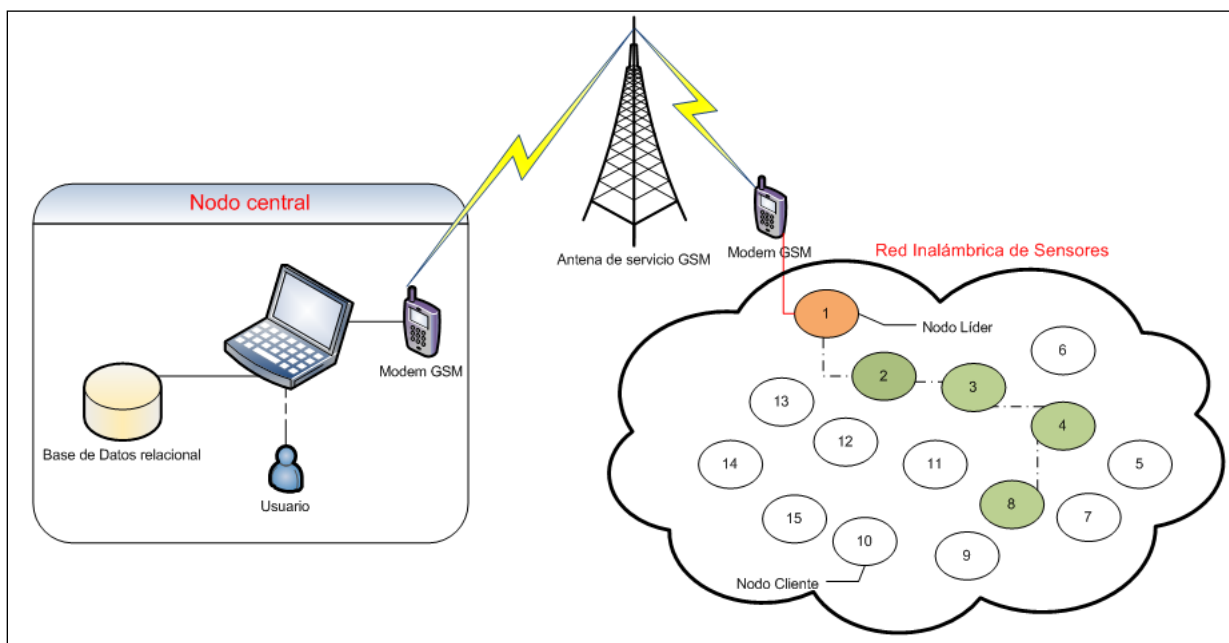


Figura 1. 1 Esquema general de la estructura y comunicación hacia el nodo de almacenamiento, [2].

El hardware de control de acceso al medio inalámbrico seleccionado en este sistema de comunicación es un teléfono celular funcionando como módem con capacidad de conexión a la red inalámbrica GSM (Sistema Global para las comunicaciones Móviles). El módem trabaja bajo el Servicio de Mensajes Cortos (SMS) para enviar información de un punto a otro.

Las rutinas de software desarrolladas permiten manejar la aplicación del modelo de almacenamiento y estructuración de datos en el sistema gestor de bases de datos MySQL, además de controlar el dispositivo GSM seleccionado.

Otra solución a la comunicación entre nodos sumidero y de almacenamiento fue implementada por el Ing. Miguel Fonseca, y consiste en un módem GSM de conexión USB EDGE (por sus siglas en inglés de Enhanced Data Rates for GSM Evolution) basado en el servicio de mensajería corta SMS para realizar el envío de datos entre nodos. En ésta solución se incorporaron dentro del sistema operativo SIWA-RTOS rutinas de control para el módem y para el manejo de información, lo cual permitió sintetizar el funcionamiento del sistema a la red de sensores original.

El sistema operativo que utilizan los nodos de la red es el SIWA-RTOS, versión modificada del FreeRTOS, el cual constituye un sistema operativo de tiempo real de licencia libre. Las modificaciones realizadas en SIWA-RTOS lograron incorporar en el sistema operativo rutinas de control en tiempo real de los periféricos, esencialmente el puerto USB al cual se conecta el módem GSM trabajado. Estas rutinas de control se basaron en los comandos AT Hayes, instrucciones creadas para controlar un modem de tipo GSM, las cuales se utilizan para realizar una comunicación entre cualquier dispositivo que actúe como host de la aplicación y el módem GSM.

Para el presente proyecto se deberán unificar las soluciones de comunicación de la información mencionadas anteriormente, de manera que se sintetice en un sistema más eficiente y óptimo para las aplicaciones futuras que se le darán a la red de sensores CRTECMOTE.

1.2. Problema existente e importancia de su solución

1.2.1. Definición del problema

Actualmente para la red CRTECMOTE, el bloque de comunicaciones implementado entre un nodo sumidero y un nodo de almacenamiento comprende el uso de un módem GSM, el cual se utiliza la red de telefonía celular del ICE para el tráfico de datos, pero la transmisión que se está realizando permite únicamente el

envío de una medición a la vez, por medio de un formato de texto del servicio de mensajería corta SMS.

Cuando el dato se recibe en el nodo de almacenamiento, éste es incluido en una base de datos conservando el framing¹ de la trama recibida y dividiendo la información en un conjunto de tablas de almacenamiento. Estas tablas establecen grupos de datos de un mismo tipo o contexto, y se relacionan unas con otras bajo el esquema de uniones lógicas llamadas “llaves”. Cada tabla tiene una “llave primaria” (primary key) única que la identifica. Una tabla “padre” pura solamente tiene llave primaria. Una tabla “hijo”, además de la llave primaria, tiene llaves secundarias llamadas “llaves extranjeras” (foreign keys) y son utilizadas para apuntar de manera lógica a las llaves primarias de las tablas tipo padre. El diseño del modelo descrito fue implementado tal como se muestra en la figura 1.2.

Este proceso de almacenamiento se repite para cada dato recibido, de manera que el ciclo de comunicación comprende el envío y almacenamiento de un único dato a la vez, lo cual vuelve ineficiente el sistema de comunicación, aumentando el costo del uso del estándar GSM al no enviar la información de las mediciones obtenidas mediante algún método alternativo de información comprimida, datos binarios o la codificación propia de los caracteres para la trama a transmitir.

Por tanto, para lograr la optimización de este sistema que posee redundancia de procesos, bajo los parámetros de eficiencia en el consumo de potencia y transmisión de datos, se hace necesario maximizar la carga de datos efectiva a transmitir, por medio de la selección de protocolos de comunicación compatibles con el hardware existente para los nodos asociados y lograr un mejor empaquetamiento de los datos.

¹ Un frame (o marco) es un paquete de datos de longitud fija o variable, que ha sido codificado por un protocolo de comunicaciones en la capa de enlace de datos, para la transmisión digital sobre un enlace nodo-a-nodo. Tomado de <http://www.alegsa.com.ar/Dic/data%20frame.php>

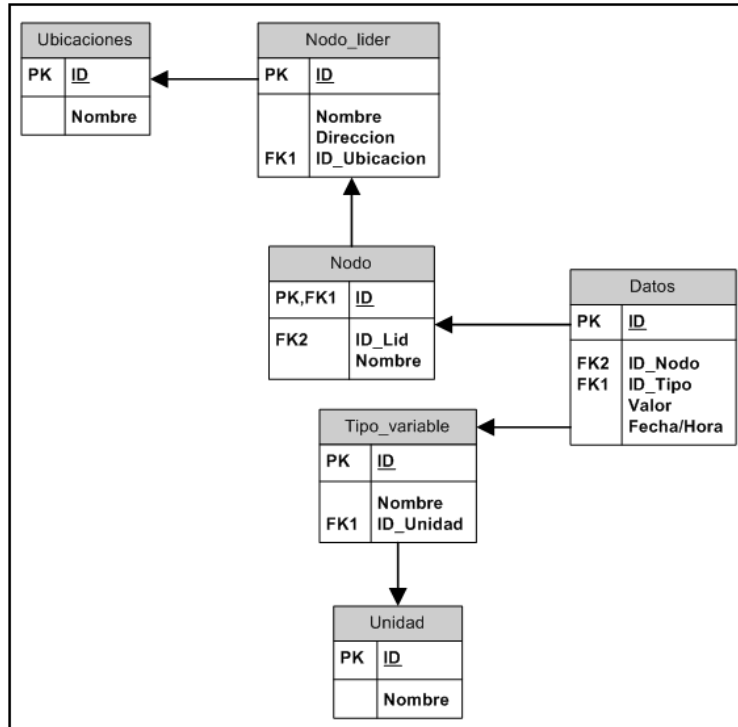


Figura 1. 2 Modelo de la base de datos relacional para el nodo de almacenamiento, [2].

De lo expuesto anteriormente se plantea una hipótesis en la cual se quiere optimizar el sistema de comunicación entre un nodo sumidero y un nodo de almacenamiento, por medio de la selección correcta del sistema de transmisión de información, con lo cual se logre aprovechar más eficientemente el protocolo a utilizar, esto según criterio ingenieril discutido con el director del proyecto.

1.2.2. Impacto económico

El impacto económico del proyecto se ve determinado por el costo final de la transmisión de datos en el enlace celular entre los nodos trabajados. Dicho costo depende de la cantidad de datos que se transmiten, la frecuencia de envío de los datos y la implementación actual de la transmisión.

Como se mencionó en el entorno del proyecto, al finalizar el período de ejecución del mismo, se espera montar una Red Inalámbrica de Sensores en una de las aplicaciones previstas, las cuales comprenden la ubicación de la red en localidades remotas y en ambientes con propuesta de ahorro económico. Es por esto, que el costo de la transmisión de información entre los nodos es un factor importante y definitorio,

ya que se desea presentar para la implementación de la red un protocolo de comunicación que reduzca dicho costo al mínimo, pero asegurando a la vez una transmisión eficiente y confiable.

Del trabajo realizado por el Ing. Miguel Fonseca, donde se especifica que la tasa de transmisión de datos es de 160bps por mensaje de texto, se puede cuantificar el costo actual de la transmisión de información, el cual sería de 0.01063colones/bit según la tarifa de ₡1,70 por mensaje de texto del ICE.

Tomando en cuenta el costo actual, se establece por criterio del director del proyecto, que la optimización del protocolo de comunicación deberá conllevar a una disminución del 50% en el costo de la transmisión de datos entre los nodos de almacenamiento y sumidero.

1.2.3. Síntesis del problema

El costo de la transmisión de datos por el enlace de comunicación entre el nodo sumidero y el nodo de almacenamiento no es viable para aplicaciones con comunicación masiva de información, esto debido a las deficiencias del protocolo utilizado en el enlace.

1.2.4. Importancia de la solución

La importancia de este proyecto reside en la correcta selección de un protocolo de comunicación basándose en los resultados obtenidos teóricamente, con lo cual además se podrá implementar físicamente el sistema de comunicación para la Arquitectura Abierta CRTECMOTE, de manera que la transmisión de información entre los nodos respectivos sea eficiente, en términos de velocidad, confiabilidad, disponibilidad del servicio y costo de la transmisión.

1.3. Solución seleccionada

El nuevo protocolo a seleccionar para la transmisión de datos en la red CRTECMOTE debía cumplir con los requisitos de reutilizar el hardware disponible actualmente, disminuir el costo económico de transmisión en al menos un 50% y ofrecer una mayor confiabilidad al transmitir información.

Luego de investigar los protocolos que era posible utilizar con el hardware disponible, se seleccionó el protocolo GPRS, ya que trabaja sobre una arquitectura mucho más similar a la de GSM y además se encontró más información sobre los costos del servicio ofrecido con este protocolo en el ICE.

Por medio del uso de la herramienta OMNET++ se procede a simular distintos escenarios de aplicaciones reales de transmisión de datos en la red CRTECMOTE utilizando los protocolos GSM y GPRS, esto con el fin de determinar de manera teórica el rendimiento de cada protocolo. Se definen además dos casos de acceso a los servicios de telefonía GSM y GPRS, donde aparte del nodo de la red CRTECMOTE existirán otros 499 usuarios tratando de acceder. Los casos de acceso son que los 500 usuarios realizan solicitud de conexión al mismo tiempo saturando los recursos disponibles, y que sólo 100 usuarios realicen solicitud de conexión en el mismo instante. Los resultados de esto son relevantes para definir la estadística del acceso del nodo de la red CRTECMOTE y cuál es la tasa de éxito en las solicitudes del mismo.

Se implementan con el lenguaje de la herramienta OMNET++ todas las clases requeridas para reproducir las arquitecturas necesarias para la transmisión de información con ambos protocolos, esto dentro de un plano espacial de simulación definido por la arquitectura celular dada por el ICE y centrado en las instalaciones del ITCR en Cartago. Los resultados de la simulación permitirán observar y comparar el rendimiento y confiabilidad entre los protocolos GSM y GPRS.

Capítulo 2: Meta y Objetivos

2.1. Meta

Determinar el conjunto de tecnologías de área extendida compatible con el bloque de comunicaciones del sistema actual de la red CRTECMOTE, de manera que se reduzca al menos en un 50% el costo económico de la transmisión de datos entre un nodo sumidero y un nodo de almacenamiento.

2.2. Objetivo General

Reducir el costo económico de la transmisión de datos por el enlace celular al menos en un 50% mediante la optimización del protocolo de comunicación utilizado por el nodo sumidero y el nodo de almacenamiento de la Red Inalámbrica de Sensores CRTECMOTE.

2.3. Objetivos Específicos

Caracterizar el volumen y la frecuencia con la que se envían los datos del nodo sumidero al nodo de almacenamiento para una aplicación específica, con el fin de cuantificar la tasa de transferencia de información requerida por el sistema.

Identificar el protocolo de comunicación que se adapta a los requerimientos del sistema, mediante la comparación de características de los protocolos existentes, tal que se seleccione aquel que se ajuste a la tecnología del medio de transmisión utilizado por la red CRTECMOTE.

Desarrollar un conjunto de rutinas de software que permitan la implementación teórica del protocolo elegido en la red inalámbrica de sensores CRTECMOTE.

Capítulo 3: Marco Teórico

3.1. Descripción del sistema

Las WSN están formadas por nodos individuales que son capaces de interactuar con el ambiente al monitorear o controlar parámetros físicos, de manera que estos nodos son fuente de información que se transfiere a otros puntos de la red. Dicha transferencia de información entre nodos podría ser alambrada, pero para muchos de los escenarios de aplicación de las WSN, esto constituiría un obstáculo de implementación, por el alto costo (en el caso de un gran número de dispositivos en la red), por los problemas de mantenimiento que requiere el cableado, además de que retiene a los dispositivos en su movilidad y ubicación espacial, alejándolos de los fenómenos que deberían monitorear o controlar. Es por estas razones que las redes de sensores ahora toman para la comunicación medios inalámbricos, manipulados por medio de diversos protocolos de comunicación.

Para establecer los protocolos de comunicación necesarios para una WSN, se debe conocer primero la topología de la red y cuáles son las principales funcionalidades y modos de transferencia de información para una aplicación específica.

La transferencia de información se realiza desde los nodos clientes a cargo de los sensores (fuentes de información) hasta los nodos sumideros en los cuales la información es requerida para su manipulación. Existen principalmente tres opciones para el nodo sumidero: puede ser parte de la red como un nodo cliente más, puede ser un dispositivo externo a la red que puede interactuar con la misma, o puede ser un nodo con función de puerto de enlace, "gateway", hacia una red más grande (como Internet) en donde la solicitud de información puede provenir de un nodo muy lejos de la red pero conectado indirectamente con la misma. En la figura 3.1, se muestra un esquema de los tres tipos de funciones que podría tener el nodo sumidero.

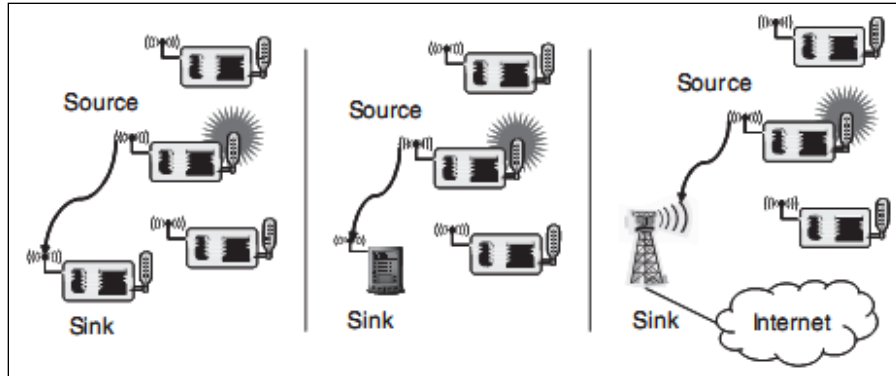


Figura 3. 1 Tres tipos de función para el nodo sumidero en una WSN sencilla, [3].

Los protocolos de comunicación para WSN tendrán que dar un soporte adecuado según la función de los nodos asociados a la comunicación y a la forma de movilidad, es decir, si los nodos clientes o sumideros tienen ubicaciones estacionarias o móviles, o si por el contrario el evento que se está monitoreando requiere de características de rastreo para identificar su movimiento espacial.

Para el caso de la red CRTECMOTE se monitorean variables físicas por medio de sensores asociados a nodos clientes de ubicación fija; el nodo sumidero será también de ubicación fija, pero se desea que cumpla la función de puerto de enlace hacia una red de mayor tamaño, tal que permita mayor eficiencia en la transmisión de información.

Para el diseño del protocolo se debe tomar en consideración además la escalabilidad que vaya a tener la red, tal que las características de rendimiento se mantengan a pesar del tamaño de la misma. La recomendación que hacen los autores Karl y Willing es que la implementación de los protocolos permita un soporte adecuado de la escalabilidad, en vez de concentrar el diseño en obtener la mayor escalabilidad posible, [3].

Como ya se mencionó anteriormente, se desea implementar para la red CRTECMOTE nodos sumideros con funciones de puertos de enlace, ya que la red necesitará interactuar con otros dispositivos de información fuera de la red local, para lo cual se necesitará que el nodo “gateway” permita la comunicación inalámbrica de información por medio de la red celular, tal como se muestra en el esquema de la figura 3.2.

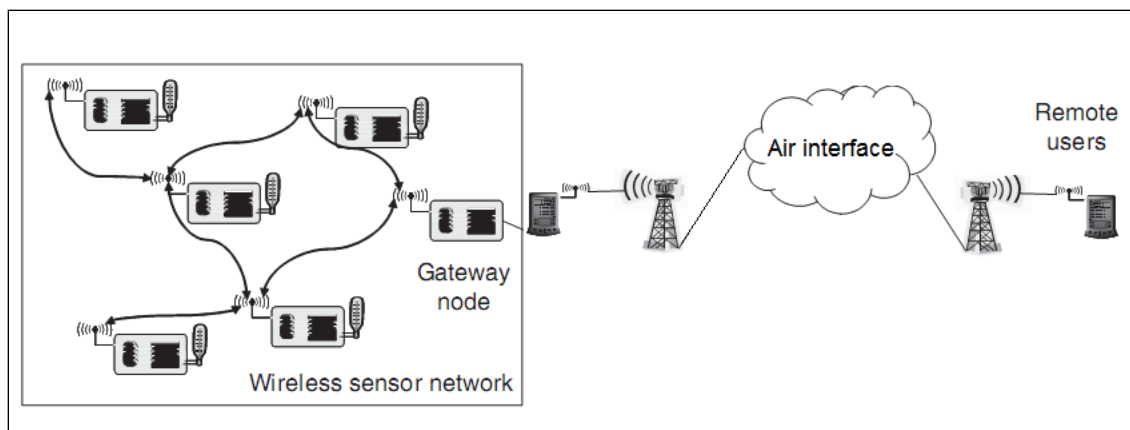


Figura 3. 2 Nodo de enlace (gateway) en una WSN permitiendo comunicación e interacción con dispositivos fuera de la red, [3].

Actualmente el modelo bajo el cual se rige la red CRTECMOTE consiste en 5 niveles de trabajo, tal como se muestra en la figura 3.3. El nivel de campo consiste en los sensores y actuadores, proveedores de información hacia la red. El nivel de conectividad comprende la recopilación de la información proveniente de todos los sensores, así como el pre-procesamiento de dicha información para su transmisión al siguiente nivel de la red. El nivel siguiente cumple las funciones de almacenamiento de los datos pre-procesados y su organización en bases de datos para su posterior acceso y análisis.

Aplicación
Configuración y administración de la red
Almacenamiento de datos
Conectividad
Campo

Figura 3. 3 Modelo de trabajo de la red CRTECMOTE.

En el nivel de configuración y administración de la red se ejecuta la inicialización y configuración de la conectividad de la red, esto según la información proporcionada por los perfiles de aplicación, además de la localización y posicionamiento de nodos, manejo de seguridad y administración de la topología de la red. Y en cuanto al nivel de aplicación, este comprende diversas aplicaciones para manipulación de los sensores, en las cuales se podría enviar o recibir información de los sensores, para lo cual debe configurar el nivel de administración de la red del nodo correspondiente según sus funciones y el rol que tiene dentro de la WSN.

El equipo que posee actualmente la red CRTECMOTE para la transmisión de información es un módem de conexión USB, como el que se muestra en la figura 3.4, el cual estaba siendo utilizado para enviar datos a través de GSM.



Figura 3. 4 USB EDGE Módem utilizado como equipo de transmisión de información en la red CRTECMOTE y hacia redes externas.

Algunas características que posee este módem y que se deben tomar en consideración para el desarrollo del proyecto, se mencionan a continuación:

- Permite la transmisión de archivos y el envío/recepción de e-mail, SMS y faxes.
- Frecuencias de trabajo: 850/900/1800/1900MHz.
- Operación de transmisión a través de GSM, GPRS, EDGE ó SMS.
- Tasa de transferencia de datos: hasta un máximo de 480kbps.
- Interfaz de la terminal: USB 2.0.
- Antena externa y removible.

Como parámetros definatorios en la selección de los protocolos a usar en la red CRTECMOTE se tienen los siguientes puntos:

Costo económico: el costo total en la transmisión de datos para escenarios específicos con el nuevo protocolo no debe ser mayor que el costo obtenido previamente con el envío de datos con GSM.

Complejidad de implementación: el protocolo a implementar debe permitir la utilización del equipo de comunicación que posee actualmente la red CRTECMOTE, esto con el fin de no incrementar costos en la adquisición de nuevo equipo.

Confiabilidad de transmisión: se debe comprobar que la utilización del nuevo protocolo permitirá el envío de los datos en la red CRTECMOTE de manera más eficiente hacia redes externas que el protocolo actualmente utilizado.

3.2. Descripción de los principales principios electrónicos relacionados con la solución del problema

A continuación se describirán los conceptos más relevantes utilizados en el desarrollo del proyecto para la optimización del protocolo de comunicación utilizado para la transferencia de datos en la Red Inalámbrica de Sensores.

3.2.1. Sistema Global para las comunicaciones Móviles (GSM)

GSM es una tecnología digital celular abierta usada para transmitir voz y servicios de datos móviles. El Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI) lo desarrolla como el estándar para los teléfonos celulares, con el fin de lograr una normativa que fuera adoptada mundialmente. GSM digitaliza los datos, para luego enviarlos por medio de un canal, el cual funciona en diferentes bandas de frecuencia. En la tabla 3.1 se presenta un resumen de las bandas de frecuencia GSM más utilizadas en los diferentes continentes y regiones.

Tabla 3. 1 Radio frecuencias utilizadas en bandas GSM, [2].

Banda	Nombre	Canales	Enlace de carga (MHz)	Enlace de descarga (MHz)	Notas
GSM 850	GSM 85	128-251	824.0-849.0	869.0-894.0	Se usa en Norteamérica, Sudamérica y Asia.
GSM 900	P-GSM 900	1-124	890.0-915.0	935.0-960.0	Se usa en Europa y es la más extendida.
	E-GSM 900	975-1023	880.0-915.0	925.0-960.0	Extensión GSM-900
	R-GSM 900	n/a	876.0-880.0	921.0-925.0	GSM ferroviario
GSM 1800	GSM 1800	512-885	1710.0-1785.0	1805.0-1880.0	-
GSM 1900	GSM 1900	512-810	1850.0-1910.0	1930.0-1990.0	En EEUU, solapa con GSM-1800

Por otra parte, GSM incluye también soporte de datos con GPRS (Servicio General de Radio por Paquetes) y EDGE. GPRS es un servicio para enviar y recibir paquetes de datos a altas velocidades, desde 56Kbps hasta 114 Kbps, mientras que EDGE se destaca con velocidades que van desde 110-130 Kbps hasta una velocidad pico 480 Kbps y que representa la evolución desde GPRS, [4].

El sistema de telefonía celular GSM emplea codificadores parcialmente más complejos que otras clases, pero que proporcionan la mejor relación entre la calidad de voz y el nivel de compresión. GSM es la tecnología con mayor despliegue en el mundo, a nivel de redes en operación y clientes vigentes, y que a su vez presenta un (Subscriber Identity Module) SIM que lleva cada teléfono y le provee al usuario una mayor flexibilidad en la manera como usa su teléfono sin perder la seguridad y privacidad de sus comunicaciones.

La tecnología GSM ofrece nitidez y claridad de voz en las llamadas, diferentes tipos de dispositivos móviles se basan en esta tecnología y permite la comunicación entre los usuarios en distintas ubicaciones alrededor del mundo. Hay seguridad en sus comunicaciones y es pionera de servicios tales como: envío de mensajes de texto, mensajes multimedia, imágenes, videos, fotos, juegos y televisión móvil en tiempo real.

El sistema global para móviles revolucionó la tecnología predecesora (analógica) estableciendo la transmisión de voz y datos en formato digital, [5]. Éste cambio es considerado como la segunda generación o segunda fase (2G) en los sistemas de comunicación móviles, lo que hizo posible bajar el costo de las redes de operación aumentando la capacidad para cubrir la demanda del servicio, bajar los niveles de interferencia, integrar la transmisión y conmutación de la información.

3.2.1.1. Estándares de calidad GSM

Estos estándares definen un sistema de comunicaciones de radio que sólo funciona correctamente si cada uno de sus componentes opera dentro de normas o límites precisos. Es así como controlar la calidad es uno de los requerimientos más importantes para el diseño de una red GSM, así como los servicios que esta presta.

La ETSI es el encargado de dictar las normas para el sistema GSM. Los actores que define la ETSI son los siguientes: usuario, operador, fabricante y, por último, la instancia reguladora de un País, [6]. Para este proyecto únicamente se tendrán en cuenta las del usuario y operador.

Existen así varios aspectos que conforman la calidad de servicio:

- Accesibilidad de la Red: se refiere a la disponibilidad de recursos suficientes para prestar un servicio, tales como: cobertura, capacidad y disponibilidad de la red.
- Nivel de Potencia Recibido: información sobre la potencia involucra cobertura, cuando no hay o temporalmente falla. La cobertura es un factor de calidad en el servicio de GSM, y es dada por cada celda que ofrece señal independientemente del Operador. Es medido en decibelios.
- Disponibilidad de la Red: se refiere cuando el usuario quiere acceder a un servicio de GSM, y la red atiende la petición sin ningún problema (por ejemplo si se desea realizar una llamada). Algunas veces el servicio solicitado no es atendido por la red, por lo tanto el nivel de calidad se ve afectado. Existen factores que no permiten que la red preste el servicio en el momento solicitado tales como: congestión de la red, falta de recursos para atender al usuario, interferencia, entre otras, [7].

- Accesibilidad al Servicio: se relaciona con la disponibilidad del servicio, tiempo de acceso y tiempo fuera de servicio. Los parámetros que se miden para determinar este criterio de calidad son, [6]:
- Tiempo de Acceso a un Servicio: tiempo que tarda un servicio, desde que el usuario lo solicita hasta que el sistema le da respuesta. Una respuesta del sistema es darle acceso a la petición o indicarle al usuario que no está disponible en ese momento.
- Resultado del Acceso al Servicio: es correcto si un servidor responde correctamente a una petición, o fallido si el servidor no responde o no proporciona una de las respuestas esperadas.
- Integridad del Servicio: se refiere a la calidad de servicio que ofrece GSM durante el tiempo que dure la prestación de alguna solicitud.
- Caída del Servicio: cuando se le presta un servicio a un usuario que está en el área de cobertura y es interrumpida por factores ajenos a él.
- Calidad de la Señal de Voz: este parámetro permite medir la calidad de la señal de voz recibida por el dispositivo móvil en cada instante, lo que indica el estado de la calidad de la Red.
- Calidad de Transmisión de Datos: la tasa de error BER (Bit Error Rate), mide la calidad del canal establecido por la cantidad de errores en la transmisión de datos.
- Velocidad de Acceso a un Servicio o Velocidad de Transmisión: es la cantidad de bits por segundo que se miden en una determinada transmisión durante el tiempo que dura la conexión.
- Efectividad del servicio: es el porcentaje de accesos al servicio realizados y completados satisfactoriamente, frente a la totalidad de los accesos realizados, [8].

- Parámetros mínimos para la Calidad de la Voz en GSM: existen ciertos parámetros regulados que los Operadores deben tener en cuenta como mínimo para garantizar calidad en sus servicios. Estos son:
 - i. Intento de llamadas no completadas: este debe ser menor al 1% sobre el total de intento de llamadas.
 - ii. Llamadas caídas: este valor debe ser menor al 3% del total de llamadas.
 - iii. Tiempo de establecimiento de llamada: debe cumplirse antes de 12 segundos para establecer el servicio.

3.2.1.2. Arquitectura GSM

En una red celular, su arquitectura la compone, por un lado la división del territorio en celdas, y por otro, el reparto de los canales de radio entre ellas. El tamaño de las celdas varía a partir de una serie de condiciones: el relieve del terreno (llano, montañoso), la localización (urbana, rural, suburbana), cantidad de abonados (usuarios) y la naturaleza de las edificaciones, [6].

El concepto principal sobre el cual se fundamentan los sistemas móviles celulares GSM es la reutilización de los canales, conocido como *handover*, por medio de la división del terreno en celdas adheridas y continuas. Esta reutilización no es posible en celdas adyacentes, pero en otras más alejadas si es posible. Mientras más pequeñas sean las celdas, más veces puede ser utilizado un canal.

Cuando un terminal móvil se desplaza a lo largo de su zona de cobertura, se utiliza un sistema llamado *handover* para trasladar el servicio de una estación base a otra, esto cuando la calidad del enlace es deficiente o cuando el nivel de potencia recibida por otra estación base es mayor de 3dB, [6].

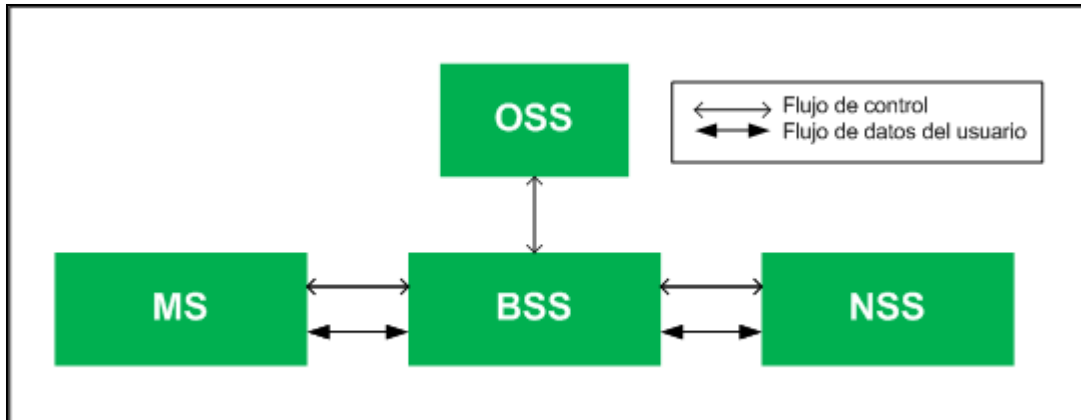


Figura 3. 5 Elementos externos de la arquitectura funcional del sistema GSM.

La arquitectura funcional del sistema GSM puede ser dividida, tal como se observa en la figura 3.5, en los siguientes elementos externos:

- Estación Móvil (MS)
- Subsistema de Estación Base (BSS)
- Subsistema de Conmutación y Red (NSS)
- Subsistema de Operación y Soporte (OSS)

Los tres primeros subsistemas mencionados se componen de los elementos de red que se pueden observar en la figura 3.6. Cada subsistema abarca funcionalidades de distintas entidades que se comunican a través de interfaces usando protocolos específicos, [9].

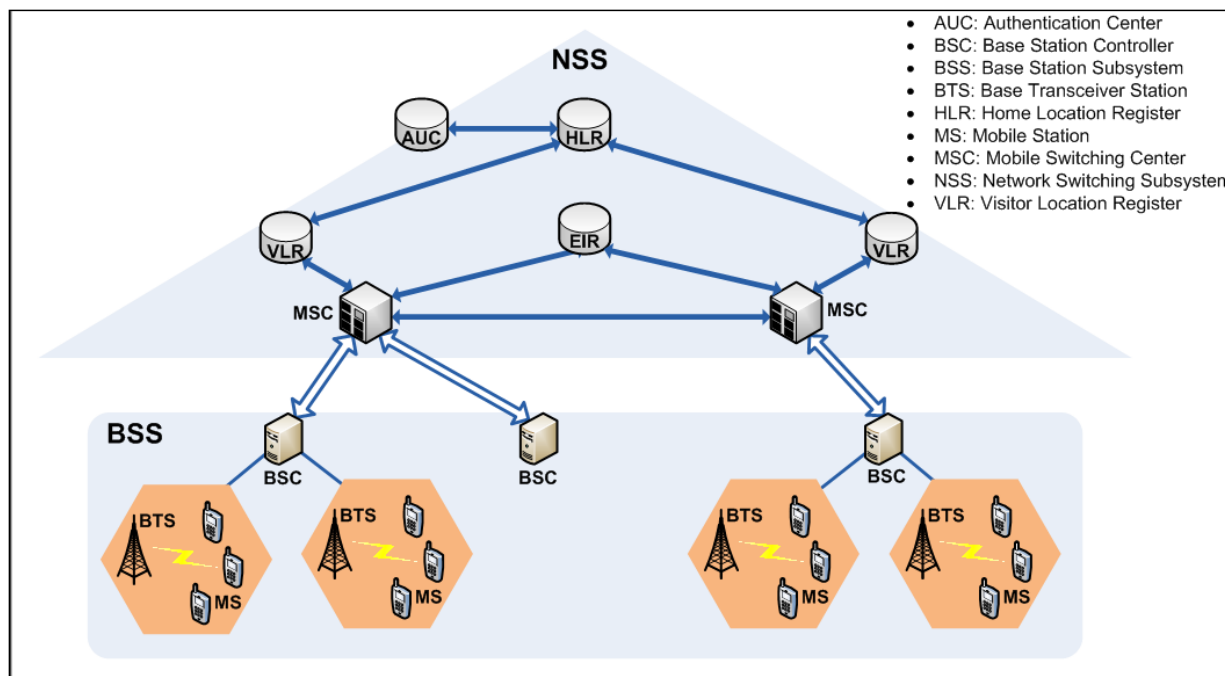


Figura 3. 6 Arquitectura del sistema de celdas GSM.

a. Estación Móvil (MS)

La estación móvil consiste en una combinación entre el equipo terminal y los datos del suscriptor. El equipo terminal es llamado Equipo Móvil (ME) y los datos del suscriptor son almacenados en un módulo aparte llamado SIM. El Módulo de Identificación del Usuario (SIM, por sus siglas en inglés), es el módulo que identifica al móvil y es la parte personalizada de la estación móvil. Contiene toda la información necesaria para realizar las funciones de autenticación del abonado y de seguridad, con lo cual protege la identidad del usuario y la información sobre el canal de radio.

b. Subsistema de Estación Base (BSS)

Este subsistema es el responsable del manejo de la red de radio y es controlado por una Central de Conmutación de Móviles (MSC). Típicamente, una MSC puede contener varios BSS, y un BSS a su vez puede cubrir una amplia área geográfica conformada por múltiples celdas (una celda se refiere a un área cubierta por una o más fuentes de frecuencia), [10]. El BSS está formado por los siguientes elementos:

- Estación Base Transceptor (BTS): es el elemento responsable del mantenimiento de la interfaz aire y de minimizar los problemas de transmisión. Las principales tareas que realiza son la identificación de *handovers*, la organización de paginación, control de los niveles de potencia de radio y la identificación de BTS. Una estación base está constituida por un conjunto de transceptores (TRX) que cubren la misma área, e incluye además un módulo que realiza la función de control común de estos transceptores (FCC). Tomando como base esta estructura, existen dos tipos de sistemas de estación base:
 - El sistema de estación integrado, donde el BSC y una BTS están integrados en un mismo equipo.
 - El sistema de estación base separado, donde el BSC es una entidad distinta de las estaciones base, a las que se conecta mediante una interfaz normalizada, denominado interfaz A-bis. Esta última estructura, es la más general, será el sistema que se simulará.
- Controlador de Estaciones Base (BSC): es el elemento central del BSS y controla la red de radio. Sus principales tareas corresponden al establecimiento de la conexión entre el MS y el NSS, la administración de la movilidad, recolección de datos estadísticos, soporte de la señalización en las interfaces A y Aire, y el control de las BTS.

c. Subsistema de Conmutación y Red (NSS)

Este subsistema proporciona la conmutación entre el subsistema GSM y las redes públicas de telefonía o datos (PSTN, ISDN, entre otras), junto con las bases de datos utilizadas para la gestión adicional de la movilidad y de los abonados, [11]. Las principales funciones que realiza son el control de llamadas, manejo de tarifas, administración de la movilidad, señalización y el manejo de los datos del abonado, [10]. Los elementos que lo componen son:

- Central de Conmutación de Móviles (MSC): es el elemento encargado del control de llamadas en la red móvil. Identifica el origen y destino de una llamada, así como el tipo de la misma. Una MSC actúa como puente entre una red móvil y una

red fija llamada Gateway MSC. Sus principales tareas son la inicialización, enrutamiento, control y finalización de las llamadas, así como de la información sobre las tarifas.

- Registro de Posiciones de Visitantes (VLR): es una base de datos que contiene información sobre los abonados actualmente dentro del área de servicio del MSC asociado, tal como: números de identificación de los abonados, información de seguridad para la autenticación del SIM y el cifrado, y datos sobre los servicios que el abonado puede utilizar.
- Registro de Posiciones Base (HLR): es una base de datos que mantiene un registro permanente de los abonados, es decir, de sus números de identificación y los servicios suscritos. Además de los datos fijos, el HLR también mantiene un rastreo de la localización actual de los usuarios, [10]. La localización es usada por la MSC para realizar el enrutamiento de llamadas entrantes hacia el móvil.
- Registro de Identificación de Equipos (EIR): este elemento es utilizado por razones de seguridad y permite comprobar la validez del equipo móvil. El EIR se utiliza para almacenar las identidades de los equipos móviles clasificados en tres tipos de listas: Blanca, Gris y Negra. Por una parte, la lista blanca contiene todos los equipos que han obtenido la homologación; la lista gris contiene los identificativos de los equipos que es necesario localizar debido a alguna razón técnica; y la lista negra contiene los identificativos de los equipos robados o utilizados de forma ilegal y también la de aquellos equipos que no pueden acceder al sistema porque podrían producir graves problemas técnicos.
- Centro de Autenticación (AUC): es una base de datos protegida que almacena una copia de la clave secreta guardada en la tarjeta SIM de cada suscriptor usada para la autenticación, [9].

d. Subsistema de Operación y Soporte (OSS)

El OSS es la entidad funcional donde un operador de la red monitorea y controla el sistema. Permite soporte económicamente accesible y centralizado. Las principales

áreas que trabaja son: funciones de operación y mantenimiento de la red; gestión de suscripción, incluyendo tarificación; y la gestión del equipo móvil.

En cuanto al Centro de Operación y Mantenimiento (OMC), este es un sistema de operación que se encarga de las funciones de explotación de una o varias entidades del sistema GSM. Y el Centro de Gestión de Red (NMC) es el sistema de operación que constituye la máxima jerarquía dentro del sistema de explotación. De este centro dependen todos los demás OMC, [6].

3.2.2. Servicio de Mensajes Cortos (SMS), [12]

El SMS permite el intercambio de mensajes cortos entre una estación móvil y un sistema inalámbrico, y entre un sistema inalámbrico y un dispositivo externo capaz de transmitir y opcionalmente recibir mensajes cortos.

Este servicio consiste de características de mensajes de entrada, administración, y capacidades de transmisión de mensajes. Estas características son distribuidas entre el sistema inalámbrico y el centro de mensajes SMS (MC), que juntos conforman el sistema SMS. El MC puede ser ya sea separado o físicamente integrado en el sistema inalámbrico.

Las características de administración de SMS incluyen el almacenamiento de mensajes, la edición del perfil, verificación de recibido, y capacidades de control del estado de petición. Las capacidades de transmisión SMS proveen la transmisión de mensajes cortos hacia o desde una estación móvil, y el regreso de mensajes de error y reconocimiento.

El modelo de referencia de la red SMS se muestra en la figura 3.7. Este modelo representa las entidades funcionales y las interfaces asociadas que conforman la red inalámbrica.

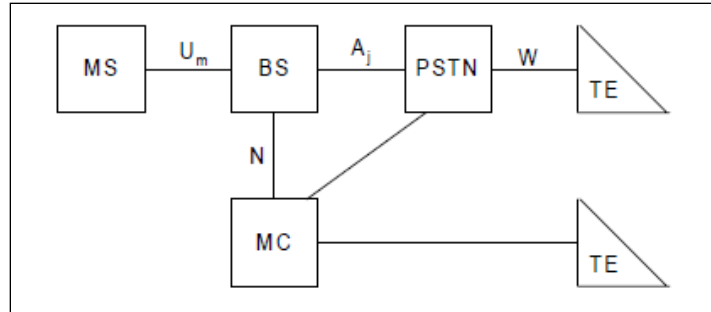


Figura 3. 7 Modelo de referencia de SMS simplificado, [12].

La Estación Base (BS por sus siglas en inglés) en el modelo contiene el equipo transceptor, el MSC y cualquier otra función requerida para la conexión de la red. Estos elementos están agrupados juntos para simplificar el modelo.

El elemento MC en este modelo representa Centro de Mensajes SMS. El Equipo Terminal (TE) es un equipo de voz o datos conectado directa o indirectamente al MC.

La pila del protocolo SMS para el modo de operación CDMA se muestra en la figura 3.8. El servicio SMS portador es la porción del sistema SMS responsable de la entrega de mensajes entre el MC y el equipo móvil del usuario. El servicio portador es proveído por las capas de Transporte y Relé de SMS.

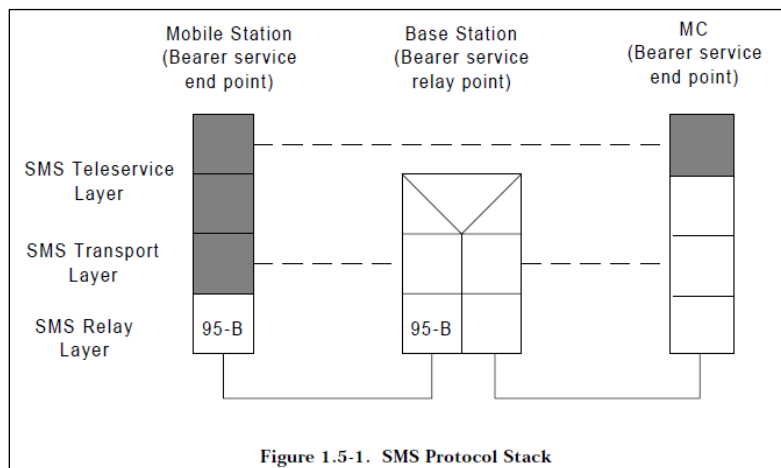


Figura 3. 8 Pila del protocolo SMS, [12].

La capa de transporte SMS maneja la entrega de mensajes punto a punto. En una entidad sirviendo como punto distribuidor, la capa de transporte es responsable de recibir mensajes SMS desde la capa relé inferior, interpretando la dirección destino y

otras informaciones de enrutamiento, y reenviando el mensaje luego a través de la capa relé de SMS.

La capa relé SMS proporciona una interfaz entre la capa de transporte y la capa de enlace usada para la transmisión de mensajes.

3.2.3. General Packet Radio Service (GPRS)

GPRS es una tecnología que comparte el rango de frecuencias de la red GSM utilizando una transmisión de datos por medio de paquetes, [13]. La red GPRS actúa en paralelo con la red GSM orientándose a la transmisión de datos y proporcionando conexiones de conmutación de paquetes hacia redes externas.

GPRS provee a los usuarios móviles acceso a servicios WAP (Wireless Application Protocol) de valor agregado y diferentes redes externas. El bloque GSM-BSS provee la interfaz de radio y la red GPRS maneja la movilidad y el acceso a dichas redes externas y servicios.

En GPRS, a diferencia de GSM, los canales de comunicación se comparten entre los distintos usuarios dinámicamente, de modo que un usuario sólo tiene asignado un canal cuando se está transmitiendo datos. De ahí que su principal atributo sea la posibilidad de disponer de un terminal permanentemente conectado, pagando una tarifa únicamente por el volumen de datos transferidos (enviados y recibidos) y no por el tiempo de conexión, [13].

La transmisión de datos inalámbrica se había estado realizando por medio de un canal dedicado GSM a una velocidad máxima de 9.6kbps. Con GPRS la velocidad de transmisión aumenta hasta un mínimo de 40kbps y un máximo de 115kbps por comunicación, y además la tecnología utilizada permite compartir cada canal por varios usuarios mejorando la eficiencia en el uso de los recursos de la red.

Algunos de los servicios que obtiene el usuario del sistema GPRS en su móvil son:

- Acceso en movilidad a Internet y correo electrónico (navegación, descarga de archivos).

- Acceso en movilidad a Intranets corporativas.
- Acceso a bases de datos y aplicaciones desde un dispositivo móvil.
- Acceso a aplicaciones WAP (agenda, correos, tareas, gestión de equipos).
- Acceso a servicios de información (canales telemáticos, banca móvil, buscadores, traductores).

3.2.3.1. Acceso a GPRS

Para lograr que la terminal móvil acceda a los servicios GPRS dados por el operador, dicha terminal deber contar con las siguientes características:

- **Capacidad dual:** adaptación para aprovechar la cobertura existente GSM para transmisión de voz y en GPRS para transmisión de datos.
- **Velocidad de transferencia:** las terminales GPRS utilizan varios canales simultáneos (o slots), cuyo número depende de cada terminal, variando de 1 a 4 para la recepción de datos y de 1 a 2 para el envío. Cada canal representa una velocidad teórica de 13.4kbps
- **Tarjeta SIM:** la terminal puede utilizar la misma SIM que para GSM, el servicio GPRS no requiere de una diferente.

Existen tres tipos de terminales móviles capaces de acceder al servicio GPRS, clasificados de la siguiente manera según el uso de los servicios:

- Clase A:
 - Uso simultáneo de GSM y GPRS.
 - 1 Time-slot para GSM y 1 o más para GPRS.
 - No hay degradación de ninguno de los dos servicios.
- Clase B:
 - Uno de los dos servicios está en suspenso mientras el otro está activo. Prioridad para GSM.

- Degradación de la calidad de servicio (QoS por sus siglas en inglés), sólo para GPRS.
- Clase C:
 - Elección manual de GPRS o GSM.
 - No hay uso simultáneo de los servicios.

3.2.3.2. Arquitectura GPRS

El sistema GPRS incorpora nuevos elementos a la red GSM existente, los cuales se encuentran resaltados en la figura 3.9. La presencia de todos los elementos no es obligatoria para cada red GPRS.

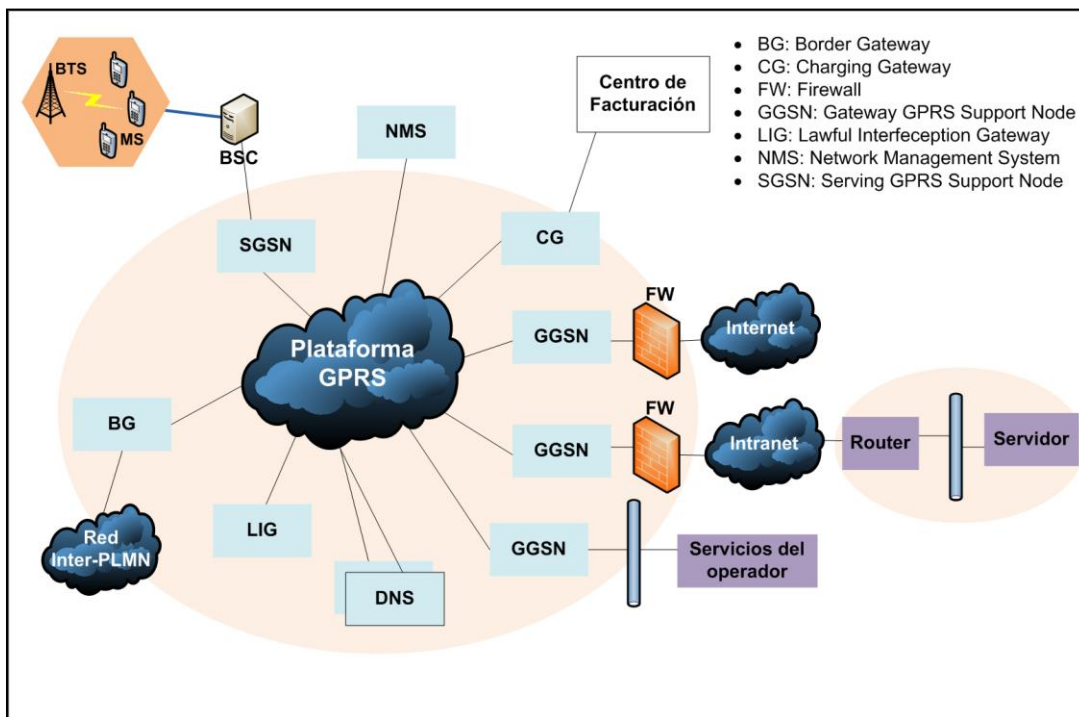


Figura 3. 9 Arquitectura del sistema GPRS.

a. Unidad de Control de Paquetes (PCU)

La PCU separa el circuito de conmutación de voz y el tráfico de conmutación de paquetes desde el usuario y los envía a las redes GSM y GPRS respectivamente. Realiza también la mayoría de la administración de los recursos de radio de la red

GPRS. La PCU puede estar ubicada en la BTS, BSC o en algún otro punto entre el MS y la MSC.

b. Nodo de Soporte de Servicios GPRS (SGSN)

El SGSN es el elemento más importante de la red GPRS. Es el equivalente del MSC en la red GSM. Sus principales funciones constituyen:

- Convertir protocolos usados en el contexto IP a los protocolos usados en BSS y MS.
- Manejar la administración de la autenticación y la movilidad.
- Enrutar información a la GGSN correspondiente cuando se está haciendo la conexión a una red externa.
- Recolectar información de tarificación y estadísticas de tráfico.
- Manejar la codificación y la compresión de datos.

c. Nodo de Soporte Gateway GPRS (GGSN)

El GGSN es el gateway con las redes externas. Toda conexión a una red de datos fija externa debe ser a través del GGSN. Las principales funciones que realiza el GGSN son:

- Enrutar paquetes dirigidos al móvil desde redes externas a la SGSN correspondiente.
- Enrutar paquetes originados en el móvil hacia la red externa correcta.
- Funcionar de interfaz entre redes IP externas.
- Recolectar información de tarificación y estadísticas de tráfico.
- Asignar direcciones IP dinámicas a los móviles ya sea por sí mismo o con la ayuda de servidores DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) o RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Service).

d. Domain Name Servers (DNS)

La esencia del DNS es la invención de un esquema de nombres jerárquico basado en dominios y un sistema de base de datos distribuido para implementar este esquema de nombres. El DNS se usa principalmente para relacionar los nombres de *host* y destinos de correo electrónico con las direcciones IP, pero también puede usarse con otros fines. Para relacionar un nombre con una dirección IP, un programa de aplicación llama a un procedimiento de biblioteca llamado *resolvedor*, y le pasa el nombre como parámetro. El resolvedor envía un paquete UDP a un servidor DNS local, que después busca el nombre y devuelve la dirección IP al resolvedor, que entonces lo devuelve al solicitante. Una vez que tiene la dirección IP, el programa puede establecer una conexión TCP con el destino, o enviarle paquetes UDP, [7].

e. Firewalls

Un firewall protege una red IP contra el ataque externo, por ejemplo, hackers en la red de usuarios móviles o en Internet. En el caso de GPRS el firewall puede ser configurado para rechazar todos los paquetes que no son parte de una conexión iniciada por un suscriptor del servicio GPRS.

f. Gateway Borde (BG)

El BG es un router que provee un túnel directo entre diferentes operadores de redes GPRS. Este dispositivo inicia operación una vez que los contratos entre operadores GPRS han sido firmados. Esto permitirá a los suscriptores conectarse a la red interna a través del GGSN Home vía la red PLMN (Public Land Mobile Network) visitante.

g. Gateway de Cobro (CG)

En el caso de la red GSM, los cobros se basan en el destino, la duración y la hora de la llamada. Sin embargo, GPRS ofrece un servicio no conexión dependiente a los usuarios, por lo cual no es posible cobrar a los suscriptores por la duración de la conexión. El cobro se basa en el volumen, destino, calidad de servicio, y otros parámetros de la transferencia de datos. Estos datos de cobro GPRS son generados

por todos los SGSN y GGSN en la red. La información es luego referida como Records de Datos de Cobro (CDR). El CG recolecta estos records, los ordena, los procesa y luego los pasa al Sistema de Facturación. Aquí el suscriptor del servicio GPRS es cargado por la transacción de datos. Todos los CDRs contienen identificadores únicos del suscriptor y la conexión para diferenciarlos.

3.2.3.3. Transferencia de paquetes GPRS

Los paquetes de datos del usuario son enviados a través de la plataforma GPRS en “contenedores”. Cuando un paquete viene desde una red externa, este paquete llegará al GGSN, se insertará en un contenedor y se envía luego al SGSN. El flujo de contenedores dentro de la plataforma GPRS es totalmente transparente al usuario: parecerá que él/ella está conectado directamente a través de un router (el GGSN) a las redes externas. En las comunicaciones de datos, este tipo de flujo virtual de contenedores es llamado túnel, [14]. Como se mencionó anteriormente, los GSNs realizan la transferencia de paquetes del usuario por medio de este túnel, como se muestra en la figura 3.10.

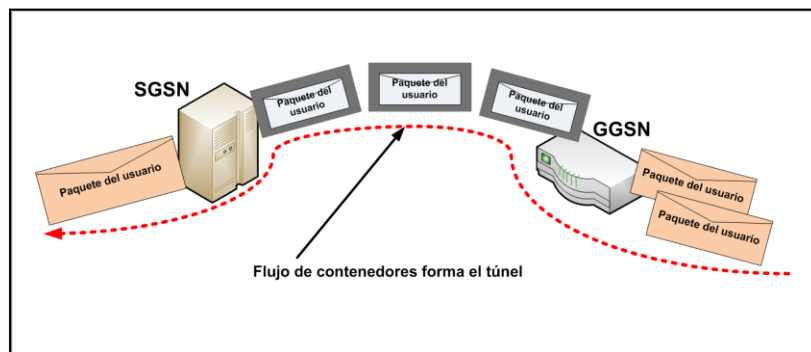


Figura 3. 10 Diagrama de los paquetes del usuario enviados a través de la plataforma GPRS dentro de contenedores.

El protocolo que realiza la transferencia por túnel en la red GPRS se llama GPRS Tunnelling Protocol (GTP). Se puede decir que la red GPRS transporta paquetes GTP entre el SGSN y el GGSN, [14].

A través de la plataforma GPRS, los paquetes IP son usados para llevar los paquetes GTP, los cuales contienen el paquete real del usuario. Esto se puede observar mejor en la figura 3.11. Los encabezados del paquete GTP, incluyendo el ID

del túnel (TID), dirán a la GSN receptora quién es el usuario. El TID es una etiqueta que le dice al SGSN y GGSN de quién son los paquetes dentro del contenedor, [14].

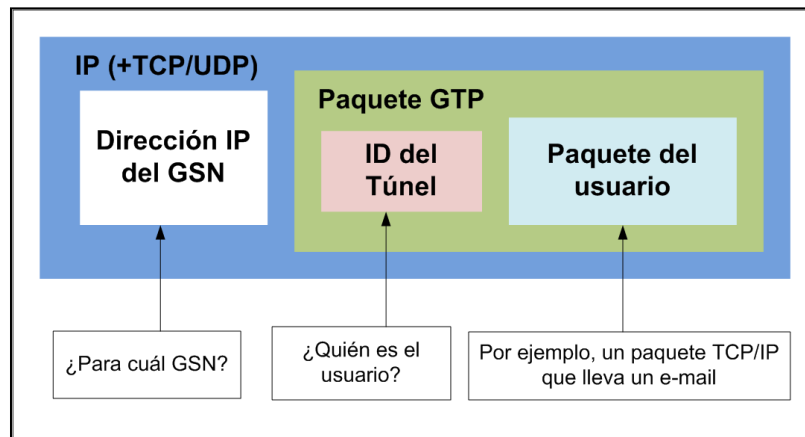


Figura 3. 11 Características del contenedor GTP.

3.2.4. OMNET++

Es una herramienta implementada para simular objetos y modular eventos discretos en redes de comunicaciones; posee también una gran cantidad de herramientas y una interfaz que puede ser manejada en plataformas como Windows y en distribuciones tipo Unix.

OMNET hace uso de varios compiladores, como por ejemplo C++. Por otra parte, OMNET es una versión libre de trabajo, para fines académicos, de la versión comercial OMNEST desarrollado por OMNEST Global, Inc. OMNET++.

Este simulador de redes recrea eventos discretos por medio de módulos orientados a objetos. Puede ser utilizado para modelar el tráfico de información sobre las redes, los protocolos de red, las redes de colas, multiprocesadores y otros sistemas de hardware distribuido; además, sirve para validar arquitecturas de hardware y evaluar el rendimiento de sistemas complejos, [15].

Este simulador utiliza el lenguaje de programación NED, que se basa en el lenguaje C++, como herramienta para modelar topologías de red. NED facilita la descripción modular de una red, es decir, un modelo en OMNET se construye con módulos jerárquicos mediante el lenguaje NED. Dichos módulos pueden contener estructuras complejas de datos y tienen sus propios parámetros usados para

personalizar el envío de paquetes a los destinos a través de rutas, compuertas y conexiones, [6].

Con el lenguaje NED se definen tres módulos: módulos simples, módulos compuestos y módulos de redes, dentro de los cuales se encuentran los componentes y especificaciones de la descripción de una red de comunicaciones.

Por otra parte, con el fin de facilitar el diseño de redes y la simulación de eventos sobre las mismas, OMNET permite al usuario trabajar gráficamente empleando el editor del lenguaje NED (GNED). Este editor es la interfaz gráfica que permite crear, programar, configurar y simular redes de comunicaciones, sin necesidad de hacerlo utilizando la codificación del lenguaje NED, ya que automáticamente GNED se encarga de generar el código del lenguaje de acuerdo al diseño y configuración que realiza el usuario en forma gráfica. Además, GNED permite acceder fácilmente a dicho código, [15].

Capítulo 4: Procedimiento Metodológico

4.1. Investigación y Diseño

4.1.1. Análisis teórico de las características de transmisión de datos de la red actual para una aplicación específica.

Para esta etapa se definieron aplicaciones específicas de la red para las cuales se desarrollará la caracterización necesaria. Así se logrará analizar de manera teórica la transmisión de datos entre los nodos sumidero y de almacenamiento.

Por medio de una herramienta de simulación de Redes Inalámbricas, se postula el comportamiento de la red según los escenarios de aplicación seleccionados y se obtienen resultados sobre la transmisión de información, dato importante para la posterior selección del protocolo de comunicación a implementar.

4.1.2. Selección del protocolo de comunicación que mejor se ajuste a las características del sistema.

Luego de realizar un estudio sobre protocolos de comunicación para aplicaciones de redes de sensores, se procedió a seleccionar el protocolo de comunicación a implementar según el mayor cumplimiento de los requerimientos necesarios para la red CRTECMOTE.

4.2. Implementación y desarrollo

4.2.1. Implementar el protocolo de comunicación seleccionado.

Se desarrollaron rutinas para implementar el protocolo de comunicación en la WSN del sistema CRTECMOTE.

Además, se realizaron pruebas para asegurar la compatibilidad del protocolo de comunicación implementado con la base de datos existente en el nodo de almacenamiento.

4.3. Verificación de solución

4.3.1. Comprobación teórica de la transmisión de información como resultado de la implementación del nuevo protocolo de comunicación.

Luego de la implementación se procedió a realizar pruebas de transmisión de datos, esto con el fin de comprobar el acceso a los servicios y recursos necesarios para la transmisión de datos desde el nodo sumidero hasta el nodo de almacenamiento.

Capítulo 5: Descripción detallada de la solución

5.1. Descripción general

Con el fin de lograr la optimización del protocolo de comunicación utilizado por la Red Inalámbrica de Sensores CRTECMOTE en la trasmisión de información, se optó por caracterizar el protocolo GSM utilizado originalmente en dicha red, con el fin de conocer los parámetros de transmisión de datos, calidad de la transmisión y costo asociado a la misma, esto por medio del diseño de una simulación del protocolo GSM utilizando la herramienta OMNET++. Dicha caracterización permite comparar los resultados obtenidos luego de implementar el nuevo protocolo de comunicación seleccionado para la Red, es decir, una modificación del protocolo GPRS que se ajusta a los requerimientos del sistema.

En primer lugar se definió cuáles son los componentes del Sistema GSM que serán tenidos en cuenta en la simulación. El objetivo es analizar el comportamiento de los parámetros mínimos de calidad por el canal de voz, por lo tanto los elementos en cuanto a la arquitectura GSM que intervendrán serán la MSC, BSC, BTS, MS y la Interfaz de Radio (UM o Air), que será el medio por donde se comunicarán los componentes BTS y MS. Después, se define también el modelo de simulación, en este caso, se quiere estudiar el comportamiento de las llamadas a lo largo del tiempo, por lo tanto será un modelo de eventos discretos centrado en las estadísticas de acceso a la red.

Se escoge OMNET++ como herramienta de simulación, ya que es un simulador de objetos discretos, y además tiene definido el módulo GSM y posee un ambiente gráfico que permite visualizar, por medio del lenguaje NED, los diferentes componentes del Sistema GSM.

Antes de implementar la simulación es necesario transformar el código que describe el módulo GSM, ya que este se encuentra desactualizado de las versiones de trabajo actuales de OMNET++. Por último se definirán los diferentes escenarios de simulación para así observar el comportamiento de los parámetros de calidad que debe brindar el Sistema GSM y cómo afectan estos a la transmisión efectiva de los datos

dentro de la Red Inalámbrica de Sensores al utilizar el protocolo GSM para la comunicación.

En la etapa siguiente, se sustituyó el protocolo GSM utilizado previamente para la comunicación, por una versión simplificada del protocolo GPRS ajustado para satisfacer los requerimientos de la Red Inalámbrica de Sensores en cuanto a la capacidad de soporte del hardware y los requisitos mínimos de transferencia de datos. Esta versión del protocolo GPRS se implementó dentro de la simulación utilizando igualmente la herramienta OMNET++ y sobre las clases GSM previamente creadas. Una vez definidos los escenarios de simulación acorde al comportamiento de la Red Inalámbrica de Sensores, se realizaron las simulaciones, obteniendo los resultados para su posterior análisis y comparación respecto a los obtenidos al utilizar el protocolo GSM.

5.2. Análisis del sistema GSM por medio de OMNET++

Para la simulación del sistema por medio de la herramienta OMNET++, se tomará solamente la interfaz de radio de la red GSM, la cual está formada por Estaciones Móviles (MS), Estaciones Base (BTS), Controlador de Estaciones Base (BSC), Central de Conmutación de Móviles (MSC) y la Interfaz Aire (AIR). Para crear estos componentes y la red GSM, es necesario declararlos mediante módulos (clases).

El módulo GSM se define como un módulo compuesto, llamado *network* y representa la totalidad de la red, mientras que sus componentes MS, BTS, BSC, MSC y AIR, se definen como módulos simples (*cSimpleModule*). La comunicación entre estos elementos de la red GSM, se realiza a través de una serie de mensajes (*cMessage*) que entran y salen de cada módulo por medio de compuertas (*gates*).

Utilizando el lenguaje NED de la herramienta OMNET++, es posible definir la topología de la red GSM. El archivo *gmsim.ned* creado contiene la declaración de los componentes MS, BTS, BSC, MSC y AIR, como módulos simples, y se indica además que la red *gmsim* incorpora a todos estos elementos. Las conexiones entre dichos elementos y cuáles son los parámetros fijos para cada módulo se especifican en este archivo también, así como las *gates* de cada uno de ellos.

En la figura 5.1 se muestra el esquema de red a implementar según las conexiones y parámetros definidos en el archivo *gsm.sim.ned*.

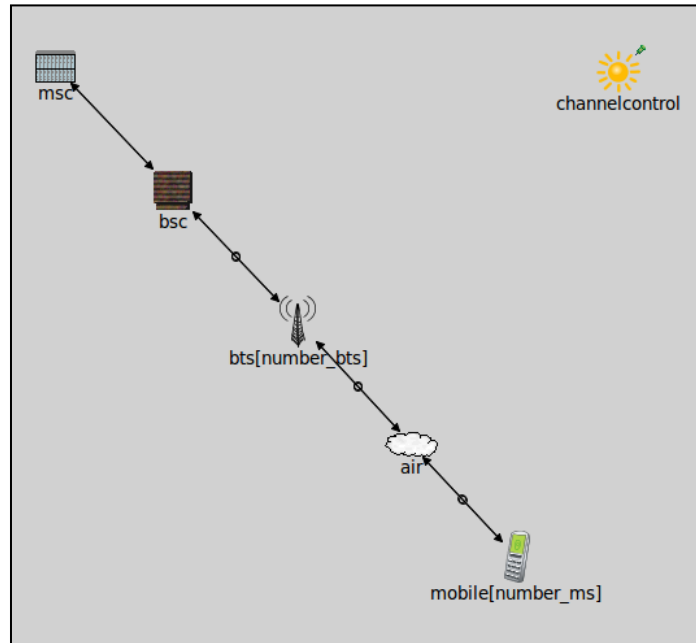


Figura 5. 1 Esquema de red GSM a implementar por OMNET++.

5.2.1. Descripción de la implementación de las clases para GSM

Cada uno de los elementos de la red GSM que se muestran en la figura 5.1 corresponden a una clase implementada por medio del lenguaje de la herramienta OMNET++, cuya funcionalidad se explicará a continuación.

a. Clase Mobile

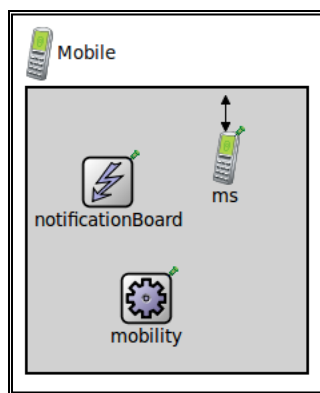


Figura 5. 2 Módulos que conforman la clase Mobile.

Esta clase comprende tres módulos que permiten simular el comportamiento de un dispositivo móvil de comunicación. Tal como se mostró en la figura 5.2 estos módulos son:

- **MS:** este módulo contiene toda la lógica para lograr el envío y recepción de los diferentes mensajes involucrados en el protocolo GSM con el fin de establecer una conexión estable e iniciar la transmisión de datos. Contiene las funciones:
 - *initialize:* encargada de la inicialización de todos los parámetros de trabajo para el móvil. Define la posición inicial del móvil, ya sea fija para el nodo CRTECMOTE o aleatoria para cualquier otro usuario. Indica además si envía la solicitud de conexión a la primera BTS en t=0 o si se espera un tiempo de retraso para iniciar la conexión, lo cual se puede ver en la figura 5.3.

```
if (par("sendMsgOnInit").boolValue() == true)
{
    ev << "Enviando mensaje inicial en mobil # " << own_addr << "\n";
    iCalls++;
    conn_req = new cMessage("CONN_REQ", CONN_REQ);
    conn_req->addPar("src").setDoubleValue(own_addr);
    conn_req->addPar("dest").setDoubleValue(selected);
    send(conn_req, "to_air");
}
else
{
    ev << "Enviando primer mensaje en mobil # " << own_addr << "\n";
    iCalls++;
    conn_req = new cMessage("CONN_REQ", CONN_REQ);
    conn_req->addPar("src").setDoubleValue(own_addr);
    conn_req->addPar("dest").setDoubleValue(selected);
    sendDelayed(conn_req, simTime()+delay, "to_air");
}
```

Figura 5. 3 Selección de envío de mensaje inicial de solicitud de conexión.

- *handleMessage:* esta función se encarga de manipular cada mensaje que llega al móvil y de enviar los mensajes de respuesta necesarios para establecer la conexión y posteriormente iniciar la transmisión formal de datos. En la figura 5.4 se muestra como para el tipo de mensaje *CONN_ACK* recibido, se adjuntan tanto datos de identificación del móvil como información sobre su ubicación, al mensaje *CHECK_LINE* de respuesta, que indicará a la BTS que revise la capacidad de conexión del enlace entre ambos dispositivos.

```

switch (type)
{
    case CONN_ACK:
        ev << "Recibido CONN ACK\n";
        i=allmsg->par("src");
        connected = selected;

        ev << "Hablando con la BTS #" << i << '\n';

        allmsg->setName( "CHECK_LINE" );
        allmsg->setKind( CHECK_LINE );
        allmsg->par("dest").setDoubleValue(connected);
        allmsg->par("src").setDoubleValue(own_addr);
        allmsg->addPar("xc").setDoubleValue(xc);
        allmsg->addPar("yc").setDoubleValue(yc);
        ev << "Enviando CHECK_LINE a BTS #" << connected << '\n';
        send(allmsg,"to_air");
        break;
}

```

Figura 5. 4 Selección de mensaje de respuesta según tipo de mensaje recibido.

- *movecar*: esta función permite asignar una nueva posición al móvil basándose en un parámetro de velocidad definido para la red, tal que la posición nueva se calcule como:

$$pos_final = pos_inicial + delay * velocidad \quad (1)$$

- *finish*: calcula las estadísticas de acceso para el móvil durante el periodo que tardó la simulación en realizar todas las llamadas programadas. Imprime en un archivo *statistic.xls* los resultados tabulados de #MS, llamadas totales programadas, llamadas completadas, número de handover, llamadas caídas y el porcentaje de llamadas completadas.
- **Mobility**: este módulo se toma de las librerías de movilidad que proporciona la plataforma INET², seleccionando el tipo de movilidad básica y lineal para los móviles distintos del nodo CRTECMOTE. El módulo contiene funciones que permiten actualizar la ubicación del móvil durante la animación generada de la simulación con OMNET++, con lo cual se logra visualizar el desplazamiento de los móviles a través del plano de trabajo en tiempo real de simulación.

² INET es un paquete de simulación de redes de comunicación de código abierto para el ambiente de simulación OMNET++. Esta plataforma contiene diversos modelos de protocolos de red tanto alámbricos como inalámbricos, incluyendo UDP, TCP, SCTP, IP, IPv6, Ethernet, PPP, 802.11, MPLS, OSPF, y muchos otros, [17].

- NotificationBoard: es parte de las librerías de INET y se incluye como requisito para poder utilizar la librería de *mobility*. Permite actualizar los datos de posición y almacenarlos para propósitos de procesamiento durante la simulación.

b. Clase AIR

Es una clase simple que simula la interfaz Aire del protocolo GSM. Se encarga de reenviar los distintos mensajes hacia la BTS o el MS según la etapa de conexión en que se encuentren. En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran las asignaciones de la interfaz para reenviar los mensajes del MS al BTS y del BTS al MS respectivamente.

```
switch (iType)
{
  // Mensajes de MS->BTS
  case CONN_REQ:
    iDest = msg->par("dest");
    ev << "Relaying msg CONN_REQ to addr=" << iDest << '\n';
    send( msg, "to_bts", iDest);
    break;
  case DISC_REQ:
    iDest = msg->par("dest");
    ev << "Relaying msg DISC_REQ to addr=" << iDest << '\n';
    send( msg, "to_bts", iDest);
    break;
  case CHECK_BTS:
    iDest = msg->par("dest");
    ev << "Relaying msg CHECK_BTS to addr=" << iDest << '\n';
    send( msg, "to_bts", iDest);
    break;
  case MS_DATA:
    iDest = msg->par("dest");
    ev << "Relaying msg MS_DATA to addr=" << iDest << '\n';
    send( msg, "to_bts", iDest);
    break;
}
```

Figura 5. 5 Asignación de mensajes en la interfaz AIR desde el MS al BTS.

```
// Mensajes de BTS->MS
case CONN_ACK:
  iDest = msg->par("dest");
  ev << "Relaying msg CONN_ACK to addr=" << iDest << '\n';
  send( msg, "to_ms", iDest);
  break;
case DISC_ACK:
  iDest = msg->par("dest");
  ev << "Reenviando msj DISC_ACK a addr=" << iDest << '\n';
  send( msg, "to_ms", iDest);
  break;
case FORCE_DISC:
  iDest = msg->par("dest");
  ev << "Relaying msg FORCE_DISC to addr=" << iDest << '\n';
  send( msg, "to_ms", iDest);
  break;
case HANDOVER_MS:
  iDest = msg->par("dest");
  ev << "Relaying msg HANDOVER_MS to addr=" << iDest << '\n';
  send( msg, "to_ms", iDest);
  break;
```

Figura 5. 6 Asignación de mensajes en la interfaz AIR desde BTS al MS.

c. Clase ChannelControl

Esta clase es parte de los módulos de INET que permiten utilizar las librerías de movilidad. Permite establecer el tamaño del plano de trabajo de la red dentro del cual se ubicaran los móviles y se transmitirán mensajes.

d. Clase BTS

Contiene todas las funciones para la simulación de las Estaciones Base. Permite definir los parámetros de ubicación para la torre, su radio de cobertura, número de TimeSlots disponibles y la potencia de trabajo. Esta clase tiene *gates* de conexión con las clases AIR y BSC, por medio de las cuales realiza la transmisión de los mensajes necesarios para establecer o terminar conexiones con móviles y transmitir los datos desde el móvil hasta el resto de la red celular.

Al recibir la solicitud de conexión de un móvil, la clase implementa la respuesta en donde solicita la información de posición del móvil dentro del plano para calcular la potencia posible de conexión entre la BTS y dicho móvil. El cálculo de la distancia entre la BTS y el MS se realiza de la siguiente manera:

$$Distancia = \sqrt{[(PosX_{BTS} - PosX_{MS})^2 + (PosY_{BTS} - PosY_{MS})^2]} \quad (2)$$

Donde si la distancia entre el MS y BTS es menor que el radio de cobertura (el cual se define como $PotenciaTX_{BTS} * FactorTX$, donde el factor de transmisión es de 200)³ entonces la potencia posible de la conexión entre ambos será calculada como:

$$Potencia_{conexión} = \frac{(RadioCobertura - Distancia) * PotenciaTX_{BTS}}{RadioCobertura} \quad (3)$$

Si la potencia de conexión obtenida es mayor a cero pero menor que el **Factor Límite de Handover** (5% de la potencia de transmisión de la BTS)⁴, se rechazará la conexión y se proveerá información de otras torres disponibles; si no es así, la conexión será aceptada por la BTS e iniciará el intercambio de datos desde el MS.

³ Valor tomado de los cálculos propuestos por los autores del proyecto "Simulación de un sistema de Telefonía Celular de tecnología GSM por medio de OMNET", [6].

⁴ Ídem.

e. Clase BSC

La implementación de la clase BSC involucra el control de las conexiones entre MS y BTS, ya que recibe notificaciones cuando la potencia de conexión para una solicitud en cierta BTS no es suficiente y se encarga de reenviar la solicitud hacia otras BTS de la red con la información de posición. La clase BSC espera respuesta de las BTS indicando si tienen TimeSlots disponibles y si la potencia de conexión con ellas para ese móvil es suficiente para realizar la transmisión de datos.

Además se implementa la función de recolección de datos estadísticos como los resultados obtenidos de potencia de conexión para todas las torres de la red según la posición del móvil a conectarse. Estos datos se almacenan en una base de datos. Se agrega una función para imprimir los datos en el archivo *Datos_MS.xls* al finalizar la simulación con el fin de poder revisar y analizar los resultados obtenidos.

f. Clase MSC

Esta clase representa el Mobile Switching Center, en donde se verifican en la base de datos VLR si el MS tiene permitido solicitar el acceso a ese servicio y datos para dar seguimiento a la posición del usuario. Si el móvil tiene permisos entonces se autoriza al BSC a proporcionar los recursos para la conexión.

Dado que el propósito de la simulación es obtener datos sobre el acceso de los móviles a los servicios de la red, la implementación se hace mucho más simplificada que el comportamiento real del MSC, con lo cual la verificación de datos se mantiene fija para todos los móviles de la red y no se implementa la base de datos VLR, sino que se programa una tabla de comparación fija de permisos. Se almacenan además datos recibidos del BSC indicando la posición del MS para cada conexión establecida, los cuales se imprimen en un archivo *Posiciones_MS.xls* al finalizar la simulación. Las funciones de identificación de móvil destino y origen, así como el enrutamiento de la información entre ellos, no se implementan ya que no son relevantes para los resultados de acceso a la red GSM a obtener de esta simulación.

g. Clase GSMSIM

La clase GSMSIM se encarga de realizar la conexión de los *gates* entre todas las otras clases para formar la red GSM de simulación de acceso, tal como se mostró en la figura 5.1. Además la clase permite establecer todos los parámetros de trabajo de la red así como la distribución de los elementos en el plano de simulación.

En la figura 5.7 se muestran los diferentes mensajes utilizados en las transacciones de solicitud y establecimiento de la conexión, así como para la transmisión de datos en la red GSM simulada. Estos tipos de mensajes se encuentran definidos en el archivo *gsmsim.h* que corresponde a la librería creada para la definición de parámetros fijos de la simulación de la red.

```
enum {  
    CONN_REQ,           // connection request           [MS->BTS]  
    CONN_ACK,           // connection acknowledgement [BTS->MS]  
    CHECK_LINE,        // check Mobile Station         [MS->BTS]  
    CHECK_BTS,         // check BTS                    [MS->BTS]  
    CHECK_MS,          // check MS                     [BTS->MS]  
    FORCE_CHECK_MS,     // check MS                     [BSC->BTS]  
    FORCE_DISC,         // force disconnect            [BTS->MS]  
    BTS_DATA,          // data from the BTS           [BTS->MS]  
    MS_DATA,           // data from the MS            [MS->BTS]  
    HANDOVER_CHK,      // check for handover          [BTS->BSC]  
    HANDOVER_END,      // end of timelimit            [BSC->BSC]  
    HANDOVER_DATA,     // data for handover           [BTS->BSC]  
    HANDOVER_MS,       // handover MS, connect to new BTS [BTS->MS]  
    HANDOVER_BTS_DISC, // handover BTS, disconnect MS [BSC->BTS]  
    DISC_REQ,          // disconnect request          [MS->BTS]  
    DISC_ACK,          // disconnect acknowledgement [BTS->MS]  
    DATA_CHK,         // data from MS saved          [BSC->MS]  
    MSC_REQ,           // check permissions           [BSC->MSC]  
    MSC_ACK,           // permissions ok, data saved   [MSC->BSC]  
};
```

Figura 5. 7 Tipos de mensajes utilizados para la simulación GSM con OMNET++.

5.2.2. Protocolo GSM simplificado implementado en la simulación

En la figura 5.8 se muestra el diagrama de funcionamiento del protocolo de comunicación del estándar GSM simplificado que se implementó por medio de la herramienta de simulación OMNET++. El protocolo original de GSM se puede observar en detalle visitando la página web en la referencia [18].

En la figura 5.8 las flechas indican la dirección de envío del mensaje, los rombos la evaluación de condiciones y los cuadrados la ejecución de acciones; las líneas verticales conectan los eventos para cada dispositivo de la arquitectura GSM simulada.

Tal como se muestra en el diagrama, el protocolo simulado inicia en el nodo #1 donde se envía el mensaje *CONN_REQ* que indica la solicitud para establecer conexión con la BTS, la cual responderá con *CONN_ACK* si posee TimeSlots disponibles para atender a ese móvil, en caso contrario revisará si existen otras BTS dentro del área, si las hay envía un mensaje *HANDOVER_MS* (nodo #2) al móvil indicando que debe cambiar de posición y conectarse con otra BTS; si no hubieran más BTS dentro del área se envía un mensaje *FORCE_DISC* (nodo #3) al móvil indicando que la llamada no puede ser concretada.

En caso de que la solicitud de conexión haya sido aceptada por la BTS, entonces el MS enviará un mensaje *CHECK_LINE* adjuntando los datos sobre su posición X y Y en el plano, los cuales serán utilizados por la BTS para calcular la potencia de conexión y verificar si ésta es suficiente para poder transmitir la información entre la BTS y MS. Si la potencia de conexión calculada es mayor al límite definido, entonces la BTS responderá al MS con el dato de potencia calculado indicándole que puede proceder a enviar los datos correspondientes a su llamada y que serán enviados desde el MS a la BTS y de allí al BSC, donde se almacenan en una base de datos, y luego al MSC donde se chequean los permisos y se almacenan datos de posición del MS y la BTS a la que está conectado. En el caso de que la potencia no sea suficiente para realizar la conexión se envía un mensaje *HANDOVER_CHK* a la BSC, para que este último envíe un mensaje *FORCE_CHECK_MS* a todas las otras BTS del área para que calculen a su vez si la potencia de conexión entre ellas y el MS es mejor tal que se pueda proceder a cambiar de BTS y reiniciar el intento de conexión, tomando en cuenta también la disponibilidad de TimeSlots para las BTS.

El protocolo finaliza para un MS cuando el número de llamadas, completadas y caídas, sea igual al número de llamadas programadas para dicho MS. En este punto finaliza la simulación y se imprimen en los respectivos archivos los datos almacenados para los cálculos estadísticos de acceso y éxito en las llamadas de cada MS.

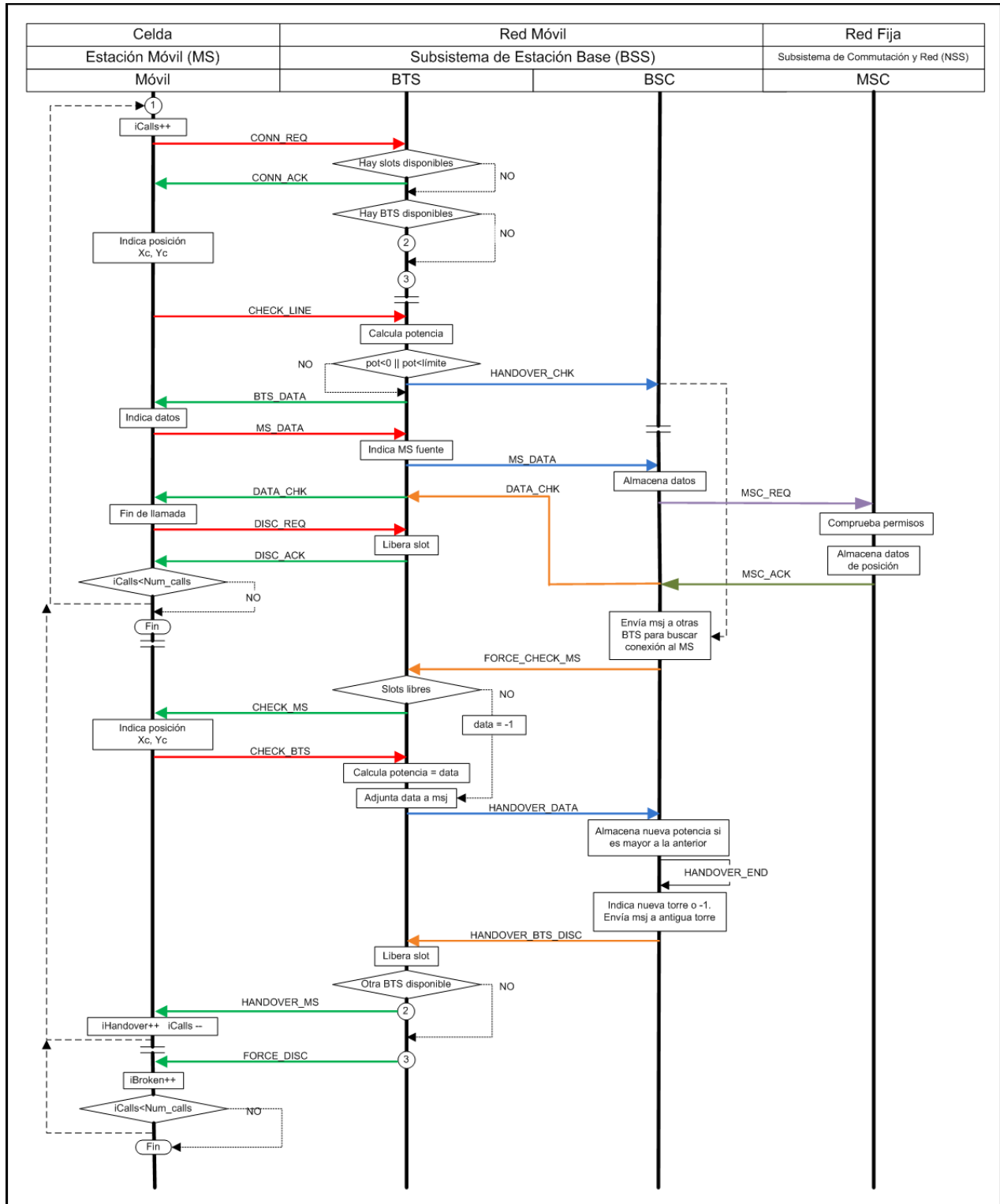


Figura 5. 8 Protocolo de comunicación GSM implementado en la simulación con OMNET++.

5.3. Implementación del protocolo GPRS por medio de OMNET++

Como se mencionó anteriormente, el lenguaje NED permite definir la topología de la red por medio de la definición de las clases pertenecientes y las conexiones entre ellas. Para esta simulación el archivo *grps_sim.ned* fue el utilizado, y permite según los parámetros definidos implementar la red GPRS tal como se muestra en la figura 5.9.

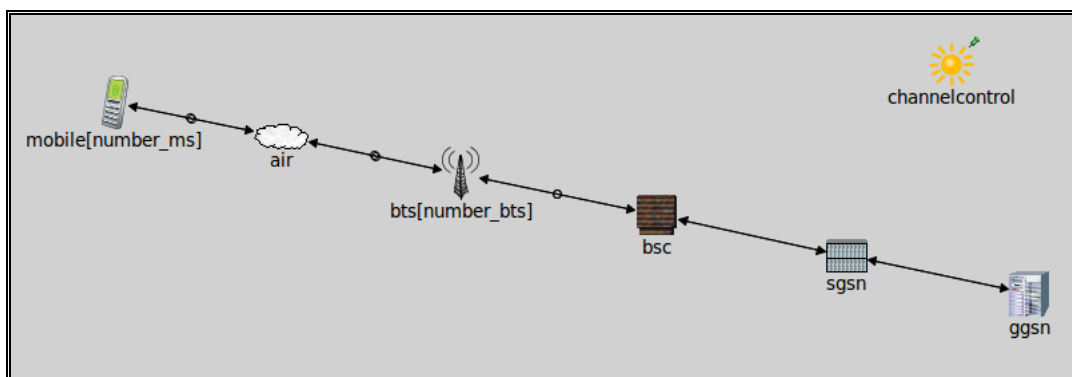


Figura 5. 9 Esquema de red GPRS a implementar por OMNET++.

5.3.1. Descripción de la implementación de las clases para GPRS

Al igual que en la implementación física real del protocolo GPRS, en la simulación por medio de OMNET++ se reutilizan algunas de las clases creadas para simular elementos de la arquitectura GSM. Se reutilizaron para la simulación de GPRS las clases *Mobile*, *ChannelControl*, *BTS*, *BSC* y *AIR*, y se crearon dos nuevas clases para simular ciertas funciones de los nodos SGSN y GGSN, específicos de GPRS.

Se realizan modificaciones a la clase BSC para incluir las interacciones de este elemento de la red con el Nodo de Soporte de Servicios GPRS (SGSN) y eliminar las existentes con el MSC, ya que éste último contiene funciones únicas para GSM. Se implementa en la clase BSC el envío de un mensaje al SGSN incluyendo información de identificación del móvil para la solicitud de activación del contexto de envío de paquetes de datos, y se espera un mensaje de respuesta confirmando que se completa la acción con éxito.

El detalle de la implementación de las nuevas clases para GPRS se describe a continuación:

a. Clase SGSN

Esta clase representa el Nodo de Soporte de Servicios GPRS, el cual funciona como módulo interfaz a la red de acceso a radiofrecuencia. La implementación de esta clase involucra el enrutamiento de información a la GGSN correspondiente al MS hacer una conexión a una red externa, y la recolección de información estadística de tránsito de datos.

Con el fin de conservar los propósitos de la simulación se simplifican las funciones de esta clase al no implementar la codificación y compresión de datos desde y hacia las redes externas, ni la conversión entre protocolos IP y los de BSS/MS, ya que los resultados que son relevantes son los del acceso y permanencia de conexión.

b. Clase GGSN

La implementación de esta clase permite simular el Nodo de Soporte Gateway GPRS. Las funciones del GGSN implementadas son limitadas ya que los propósitos del proyecto no requieren los resultados de la asignación de direcciones IP dinámicas ni del enrutamiento de datos hacia una red externa.

Las funciones implementadas comprenden únicamente la simulación de paquetes de datos provenientes de una red externa que serán enviados hacia el MS a través del SGSN, y recolectar información estadística sobre los móviles que han logrado conectarse hasta esta interfaz con las redes externas.

c. Clase GPRS_SIM

La clase GPRS_SIM se encarga de realizar la conexión de los *gates* entre todas las otras clases para formar la red GPRS de la simulación de acceso, tal como se mostró en la figura 5.9. Además la clase permite establecer todos los parámetros de trabajo de la red así como la distribución de los elementos en el plano de simulación.

En la figura 5.10 se muestran los diferentes mensajes utilizados en las transacciones de solicitud y establecimiento de la conexión, así como para la

transmisión de datos en la red GPRS simulada. Estos tipos de mensajes se encuentran definidos en el archivo *gprs_sim.h* que corresponde a la librería creada para la definición de parámetros fijos de la simulación de la red.

```
enum {
    CONN_REQ,           // connection request           [MS->BTS]
    CONN_ACK,           // connection acknowledgement   [BTS->MS]
    CHECK_LINE,        // check Mobile Station          [MS->BTS]
    CHECK_BTS,         // check BTS                     [MS->BTS]
    CHECK_MS,          // check MS                      [BTS->MS]
    FORCE_CHECK_MS,     // check MS                      [BSC->BTS]
    FORCE_DISC,         // force disconnect              [BTS->MS]
    BTS_DATA,          // data from the BTS             [BTS->MS]
    MS_DATA,           // data from the MS              [MS->BTS]
    HANDOVER_CHK,      // check for handover            [BTS->BSC]
    HANDOVER_END,      // end of timelimit              [BSC->BSC]
    HANDOVER_DATA,     // data for handover             [BTS->BSC]
    HANDOVER_MS,       // handover MS, connect to new BTS [BTS->MS]
    HANDOVER_BTS_DISC, // handover BTS, disconnect MS   [BSC->BTS]
    DISC_REQ,          // disconnect request            [MS->BTS]
    DISC_ACK,          // disconnect acknowledgement    [BTS->MS]
    DATA_CHK,         // data from MS saved            [BSC->MS]
    DATA_CON,         // check permissions             [BSC->MSC]
    DATA_ACK,         // permissions ok, data saved    [MSC->BSC]
    PDP_REQ,           // connection PDP request        [SSGN->GGSN]
    PDP_ACK            // connection PDP acknowledgement [GGSN->SSGN]
};
```

Figura 5. 10 Tipos de mensajes utilizados para la simulación GPRS con OMNET++.

5.3.2. Protocolo GPRS simplificado implementado en la simulación

En la figura 5.11 se muestra el diagrama de funcionamiento del protocolo de comunicación del estándar GPRS simplificado que se implementó por medio de la herramienta de simulación OMNET++.

En la figura se muestran principalmente las funciones de los elementos nuevos agregados a la red, los nodos SGSN y GGSN, cuyo funcionamiento se describió. El resto del funcionamiento del protocolo simplificado continúa siendo como se explicó en la sección 5.2.2, donde las funciones de inicio de conexión, comprobación de potencia y selección de la BTS de trabajo se conservan del protocolo GSM. El protocolo original de GPRS se puede observar visitando la página web en la referencia [19].

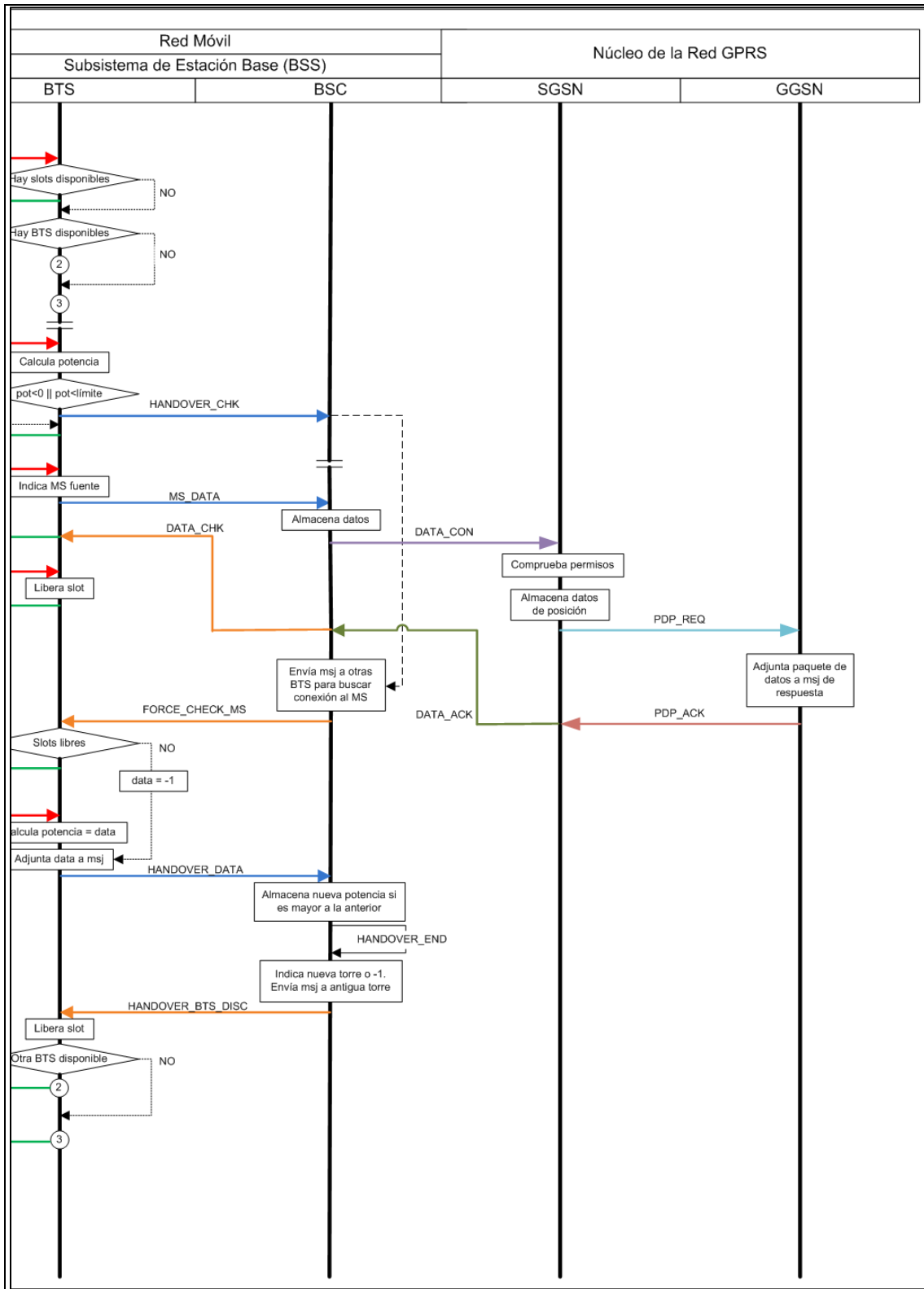


Figura 5. 11 Protocolo de comunicación GPRS implementado en la simulación con OMNET++.

5.4. Escenarios de uso de una Red Inalámbrica CRTECMOTE

La red CRTECMOTE de pequeña escala que se utiliza como base de trabajo para este proyecto, utiliza una topología de tipo estrella y está distribuida tal como se muestra en la figura 5.12.

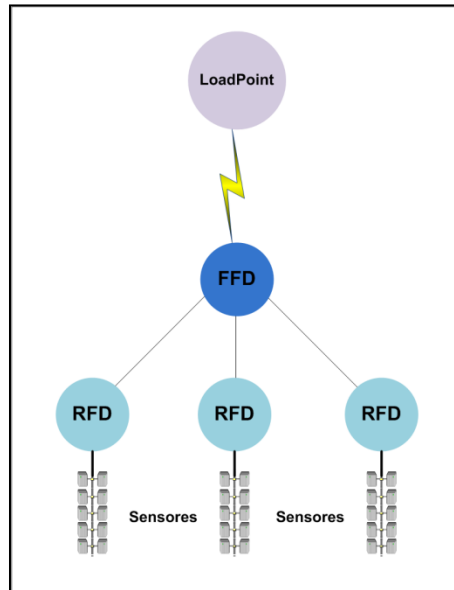


Figura 5. 12 Red CRTECMOTE de pequeña escala en topología estrella.

Se observa que la red está formada por un nodo de almacenamiento *LoadPoint*, un nodo FFD (Full-Functional Device) que representa el nodo sumidero, 3 nodos RFD (Reduced-Function Device) que representan los nodos clientes, y 10 sensores para cada uno de estos últimos.

Los factores más importantes a tomar en consideración para definir los escenarios que representen el comportamiento de la red son: número de datos transmitidos, frecuencia de muestreo de los datos, número de sensores en la red, número de nodos en la red y el tiempo total de medición. Se utiliza la siguiente ecuación para determinar el número de llamadas (mensajes/paquetes) que define cada escenario:

$$\# \text{ llamadas} = \frac{\text{tamaño del archivo a transmitir}}{\text{bytes por llamada}} \quad (4)$$

De los resultados obtenidos por el Ing. Miguel Fonseca en su proyecto “Desarrollo de un sistema convertidor de protocolos para comunicación inalámbrica vía GSM”, se tiene que la tasa de transferencia efectiva de datos enviados es de 160 bytes por mensaje enviado utilizando GSM, [16]. Para el caso del servicio GPRS se tomará como referencia la velocidad teórica de cada canal, es decir una tasa de transferencia de 1.6Kb.

Por otra parte, para la definición del tamaño del archivo a transmitir se realiza el cálculo por medio de la siguiente ecuación:

$$\textit{Tamaño del archivo a transmitir} = A \times B \times C \times D \times E \quad (5)$$

Donde:

A: # *de nodos clientes*

B: # *de sensores por nodo cliente*

C: *tamaño máximo de una medición por sensor*

D: # *de muestras tomadas por hora*

E: # *de horas totales de medición*

Se sintetizan los siguientes tres escenarios que presentan los comportamientos más representativos en cuanto a la recolección de datos y frecuencia en los tiempos de muestreo de la red:

- Aplicación de carga baja
- Aplicación de mediana escala
- Aplicación de tiempo real

Definiendo los escenarios por un tiempo total de medición de un día (24 horas), con un tamaño máximo de 15 bytes para cada medición por sensor, y con una transferencia efectiva de 160 bytes por llamada para GSM y 1.6Kb por paquete para GPRS, se muestran en la tabla 5.1 los resultados teóricos que definen los escenarios mencionados.

Tabla 5. 1 Tabla comparativa de referencia para los escenarios de trabajo de la red CRTECMOTE.

Escenario de aplicación	# de nodos clientes	# de sensores por nodo cliente	# de muestras por hora	Tamaño del archivo a transmitir	# total de llamadas GSM	# total de paquetes GPRS
Carga Baja	3	10	2	25Kb	156	16
Mediana Escala	3	10	12	130Kb	812	82
Tiempo Real	3	10	3600	38Mb	243000	23750

Estos cálculos servirán de base en la definición de los escenarios de simulación a realizar con la herramienta OMNET++ y que serán expuestos en la sección de resultados.

Capítulo 6: Análisis y resultados

6.1. Resultados

6.1.1. Selección del nuevo protocolo de comunicación

A través del análisis de las condiciones actuales del bloque de comunicaciones de la red CRTECMOTE, se encontró que el protocolo GSM tiene ciertas limitaciones para la transmisión de datos que afectaban el rendimiento general de la red. Algunas de estas limitaciones son, [13]:

- Velocidad de transferencia de datos de 9,6Kbps.
- Tiempo de establecimiento de conexión, de 15 a 30 segundos. Además, las aplicaciones deben ser reiniciadas en cada sesión.
- Pago por tiempo de conexión.
- Problemas para mantener la conectividad.

Luego del análisis de las opciones de protocolos disponibles en el país que pudieran utilizarse con el hardware existente en la red CRTECMOTE, se obtuvo que el protocolo GPRS cumple con las siguientes características que competen al uso deseado:

- Velocidad de transferencia de hasta 115Kbps.
- Conexión permanente. Tiempo de establecimiento de conexión inferior al segundo.
- Pago por cantidad de información transmitida, no por tiempo de conexión.

A partir de la información mostrada en la tabla 5.1 se investigó el costo asociado con los servicios GSM y GPRS brindados por el ICE, con el fin de determinar el costo total por la cantidad de mensajes/paquetes requeridos para cada escenario de la red CRTECMOTE.

El servicio de mensajería de texto SMS a través de la red GSM del ICE tiene un costo de ₡1.70 por cada mensaje, el cual permite enviar hasta un máximo de 160 caracteres.

El servicio GPRS brindado por el ICE se cobra por kB (kilobyte) de acuerdo a la cantidad de información transmitida (uplink/downlink). La unidad mínima de cobro es de 10kB, y el precio por kB es de \$0.0122 (₡6.149).

Tomando en cuenta el costo de los servicios, se obtienen los siguientes costos totales para la transmisión de información por medio de GSM y GPRS:

Tabla 6. 1 Costos totales generados del uso de GSM y GPRS en los escenarios de comportamiento de la red CRTECMOTE.

Escenario de aplicación	Tamaño del archivo a transmitir	GSM		GPRS	
		Total de mensajes	Costo Total (₡)	Total de paquetes	Costo Total (₡)
Carga baja	25Kb	156	265.2	16	153.72
Mediana escala	130Kb	812	1380.4	82	799.37
Tiempo real	38Mb	243000	413100	23750	233662

6.1.2. Parametrización de los escenarios de simulación del comportamiento de la red CRTECMOTE

Con base en los escenarios del comportamiento de la red CRTECMOTE definidos en la tabla 5.1, se establecieron los escenarios de simulación en OMNET++ tal que el comportamiento de la red pueda ser evaluado.

Primero se definió el esquema del espacio físico en el cual se ubicará el nodo que representa la red CRTECMOTE. La ubicación elegida se centra en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica, en Los Ángeles de Cartago, y se expande aproximadamente 3km a la redonda. La localización de las torres de acceso es arbitraria pero aproximada al comportamiento real donde estas se encuentran a una distancia de 2km entre ellas en zonas urbano residenciales, [6]. Las ubicaciones descritas se pueden observar en la figura 6.1 obtenida con la herramienta *Google Maps*.

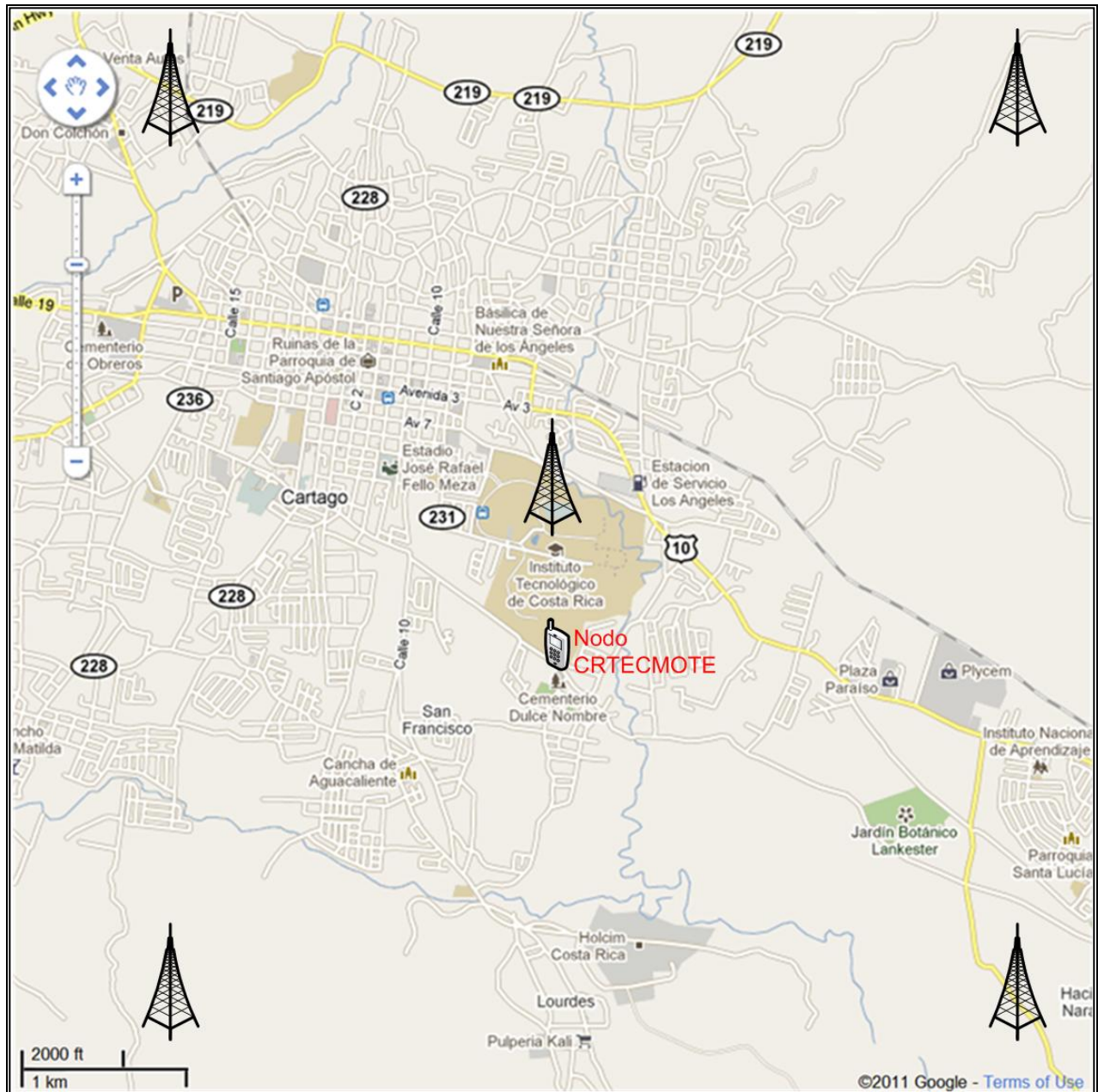


Figura 6. 1 Esquema de ubicación del Nodo CRTECMOTE en la provincia de Cartago.

Una BTS puede tener una capacidad promedio dada por 12 transceptores (TRX) por sector, y cada TRX puede usar 8 timeSlots, que son los canales que están disponibles para el tráfico de voz. Es decir, si se tienen 2 TRX se contará entonces con 16 timeSlots, que permitirán hacer 16 llamadas a la vez. Además, la potencia de una BTS debe oscilar entre 5W como mínimo y 32W como máximo valor, [6]. Para esta

simulación se utilizó un parámetro de potencia de 32W y de 176 timeSlots (22 TRX) por BTS.

Otro de los parámetros que era necesario definir es la cantidad de móviles utilizados por otros usuarios diferentes del nodo de la red CRTECMOTE y que competirían por el acceso a los servicios GSM/GPRS. Se eligió trabajar con una muestra total de 500 usuarios accediendo a la red según los siguientes casos:

1. Todos los usuarios acceden al servicio GSM/GPRS al mismo tiempo.
2. Solo 100 usuarios acceden al servicio GSM/GPRS al mismo tiempo.

Tomando en consideración la movilidad de los usuarios accediendo a la red GSM/GPRS, se estableció que el nodo CRTECMOTE tendrá movilidad nula, y el resto de los usuarios tendrán una movilidad lineal básica, implementada por medio de las librerías de *mobility* de INET, cuyo funcionamiento se explicó anteriormente.

Tomando el esquema mostrado en la figura 6.1 como un plano de dos dimensiones con escala en metros, se definió la ubicación de las torres fijas en las siguientes coordenadas (X,Y):

- BTS0 (2500, 2500)
- BTS1 (0, 5000)
- BTS2 (0, 0)
- BTS3 (5000, 0)
- BTS4 (5000, 5000)

En cuanto a la ubicación de los móviles se decidió establecer la posición del nodo CRTECMOTE en (2500, 1000), mientras que la posición de los otros usuarios se estableció como aleatoria utilizando la función *intRand(<rango>)* disponible en la librería *crng.h* de Omnet++, que funciona como interfaz para las clases generadoras de números aleatorios.

6.1.3. Resultados de simulación con OMNET++

A continuación se mostrarán los resultados recolectados con OMNET++ de la simulación de los escenarios seleccionados tanto para GSM como GPRS. En la figura 6.2 se presenta la animación de la red implementada en un plano de 5km x 5km, en donde se incluyen los 500 nodos (499 en posiciones aleatorias y el nodo CRTECMOTE fijo), las 5 BTS, la interfaz Aire y el MSC.

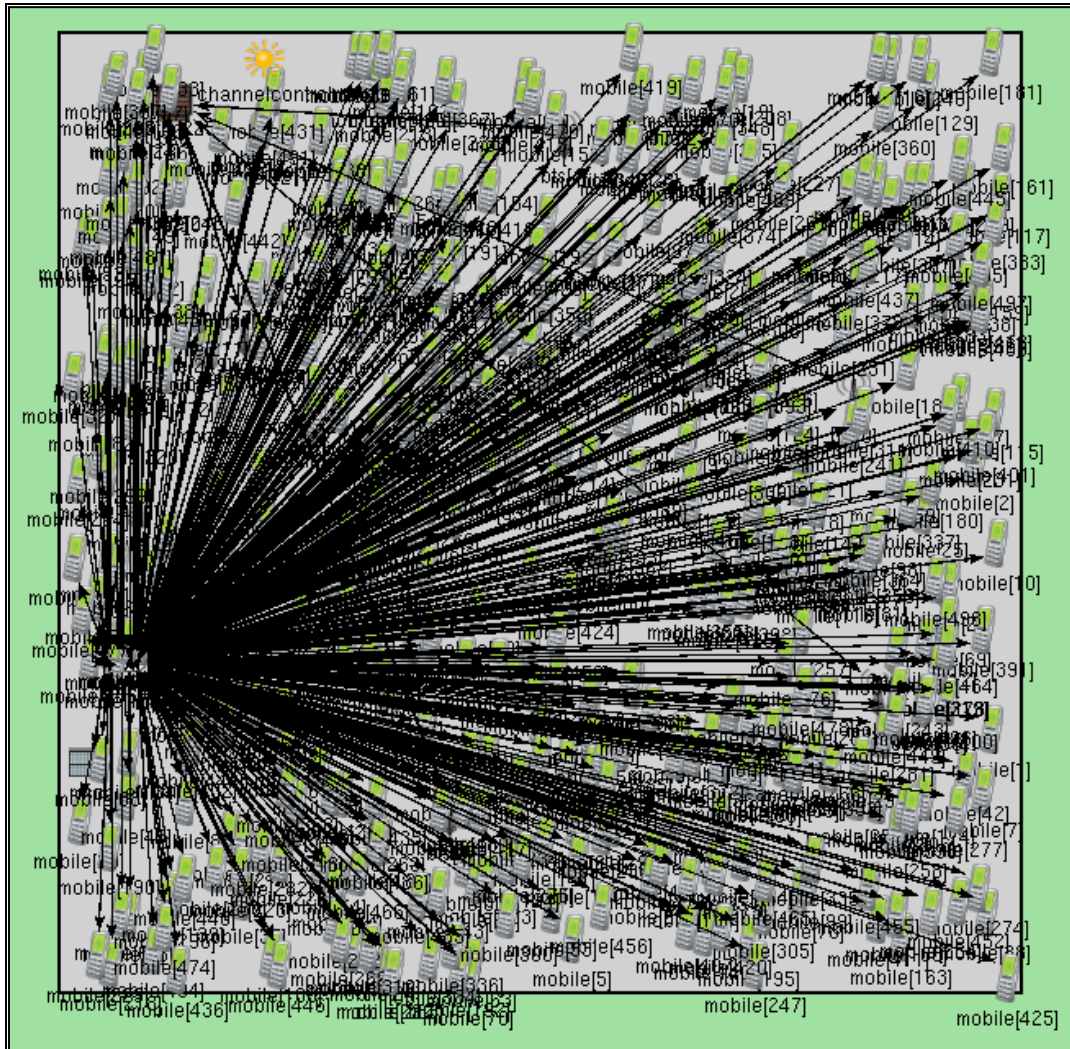


Figura 6. 2 Visualización gráfica de la red con 500 usuarios generada por la simulación en OMNET++.

6.1.3.1. Implementación del protocolo GSM

Parte de los resultados obtenidos es la red y conexión resultante en su visualización gráfica. En la figura 6.3 se puede apreciar la red y conexiones generadas por OMNET++ para la red GSM con una cantidad de móviles pequeña (15 usuarios).

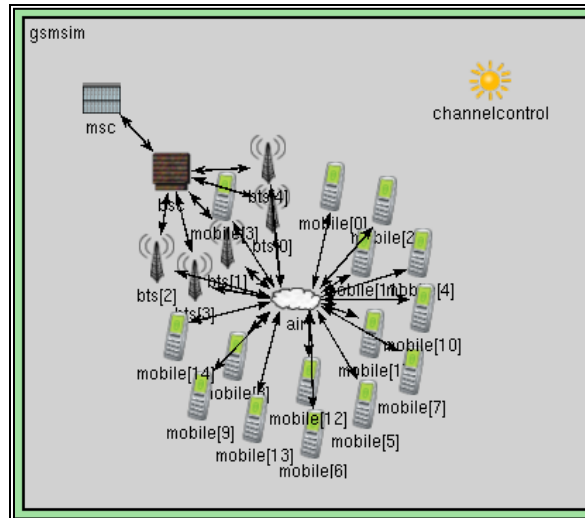


Figura 6. 3 Visualización gráfica de la red resultante GSM para pocos usuarios generada con OMNET++.

Los resultados obtenidos de la simulación del escenario de carga baja para GSM se sintetizan en la tabla 6.2 que se muestra a continuación, donde se incluyen los resultados para los dos casos de acceso a la red.

Tabla 6. 2 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de carga baja para los dos casos de acceso a la red GSM.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	2152	2152
Total de llamadas completadas	351	1950
Total de llamadas caídas	1801	202
% de llamadas completadas	16.31%	90.61%
Tasa de éxito al hacer handover	9.44%	46.61%

El comportamiento obtenido para el nodo CRTECMOTE en cuanto al acceso a la red GSM para la aplicación de carga baja de datos a transmitir se muestra en la tabla 6.3.

Tabla 6. 3 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GSM en la aplicación de carga baja.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	156	156
Total de llamadas completadas	150	154
% llamadas completadas	96.15%	98.72%
Número de handover	16	0

Para el caso de la aplicación de carga mediana utilizando la red GSM se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 6.4, donde se incluyen los obtenidos para los dos casos de acceso establecidos.

Tabla 6. 4 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de mediana escala para dos casos de acceso a la red GSM.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	2808	2808
Total de llamadas completadas	1007	2561
Total de llamadas caídas	1801	247
% de llamadas completadas	35.86%	91.20%
Tasa de éxito al hacer handover	9.42%	46.84%

El comportamiento obtenido para el nodo CRTECMOTE para el acceso a la red GSM en la aplicación de mediana escala se muestra en la tabla 6.5.

Tabla 6. 5 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GSM en la aplicación de mediana escala.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	812	812
Total de llamadas completadas	767	801
% llamadas completadas	94.46%	98.64%
Número de handover	16	0

En cuanto a la aplicación de transmisión de información de tiempo real, se obtuvieron los resultados presentes en la tabla 6.6, donde se muestran los dos casos de acceso a la red.

Tabla 6. 6 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de tiempo real para dos casos de acceso a la red GSM.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	244996	244996
Total de llamadas completadas	243195	244137
Total de llamadas caídas	1801	859
% de llamadas completadas	99.26%	99.64%
Tasa de éxito al hacer handover	9.43%	46.61%

Para el nodo CRTECMOTE se obtuvo el comportamiento para el acceso a la red GSM en la aplicación de tiempo real tal como se muestra en la tabla 6.7. Se incluyen los dos casos de acceso establecidos previamente para los escenarios de aplicación.

Tabla 6. 7 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GSM en la aplicación de tiempo real.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	243000	243000
Total de llamadas completadas	240762	241213
% llamadas completadas	99.07%	99.26%
Número de handover	16	0

6.1.3.2. Implementación del protocolo GPRS

La red y conexión gráfica para la arquitectura GPRS generada por OMNET++ a partir de los parámetros indicados y para una cantidad de móviles pequeña (15 usuarios), se presenta en la figura 6.4.

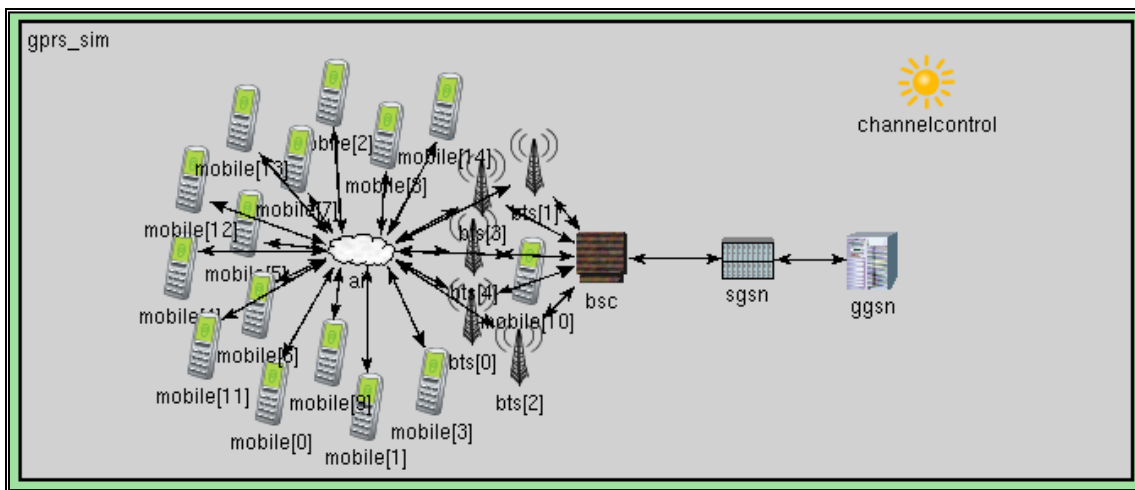


Figura 6. 4 Visualización gráfica de la red resultante GPRS para pocos usuarios generada con OMNET++.

Los resultados obtenidos de la simulación del escenario de carga baja para GPRS se sintetizan en la tabla 6.8 que se muestra a continuación, donde se incluyen los resultados para los dos casos de acceso a la red.

Tabla 6. 8 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de carga baja para los dos casos de acceso a la red GPRS.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	2152	2152
Total de llamadas completadas	1240	2032
Total de llamadas caídas	912	120
% de llamadas completadas	57.62%	94.42%
Tasa de éxito al hacer handover	43.82%	46.61%

El comportamiento obtenido para el nodo CRTECMOTE en cuanto al acceso a la red GPRS para la aplicación de carga baja de datos a transmitir se muestra en la tabla 6.9.

Tabla 6. 9 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GPRS en la aplicación de carga baja.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	156	156
Total de llamadas completadas	152	156
% llamadas completadas	97.44%	100%
Número de handover	16	0

Para el caso de la aplicación de carga mediana utilizando la red GPRS se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 6.10 para ambos casos de acceso a la red.

Tabla 6. 10 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de mediana escala para dos casos de acceso a la red GPRS.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	2808	2808
Total de llamadas completadas	1961	2606
Total de llamadas caídas	847	202
% de llamadas completadas	69.84%	92.81%
Tasa de éxito al hacer handover	37.51%	47.34%

El comportamiento obtenido para el nodo CRTECMOTE para el acceso a la red GPRS en la aplicación de mediana escala se muestra en la tabla 6.11.

Tabla 6. 11 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GPRS en la aplicación de mediana escala.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	812	812
Total de llamadas completadas	808	812
% llamadas completadas	99.51%	100%
Número de handover	16	0

En cuanto a la aplicación de transmisión de información de tiempo real, se obtuvieron los resultados presentes en la tabla 6.12, donde se muestran los dos casos de acceso a la red.

Tabla 6. 12 Resultados obtenidos de la simulación de aplicación de tiempo real para dos casos de acceso a la red GPRS.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	244996	244996
Total de llamadas completadas	243578	244815
Total de llamadas caídas	1418	181
% de llamadas completadas	99.42%	99.93%
Tasa de éxito al hacer handover	31.43%	46.61%

Para el nodo CRTECMOTE se obtuvo el comportamiento para el acceso a la red GPRS en la aplicación de tiempo real tal como se muestra en la tabla 6.13.

Tabla 6. 13 Resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE a la red GPRS en la aplicación de tiempo real.

	Caso de acceso #1	Caso de acceso #2
Total de llamadas	243000	243000
Total de llamadas completadas	242996	243000
% llamadas completadas	99.91%	100%
Número de handover	16	0

6.1.3.3. Síntesis de resultados de simulación de GSM y GPRS

La síntesis de los resultados obtenidos se presenta en la tabla 6.14, en donde se promedian los porcentajes de acceso a la red GSM y GPRS para cada escenario de aplicación, lo que permite comparar los resultados en términos de confiabilidad de los servicios brindados.

Tabla 6. 14 Porcentajes promedio de llamadas completadas para cada escenario de aplicación con los protocolos GSM y GPRS.

Escenario de aplicación	% llamadas completadas	
	GSM	GPRS
Carga baja	53.46	76.02
Mediana escala	63.53	81.32
Tiempo real	99.45	99.70

En la figura 6.5 se muestran los resultados de acceso con los protocolos GSM y GPRS gráficamente.

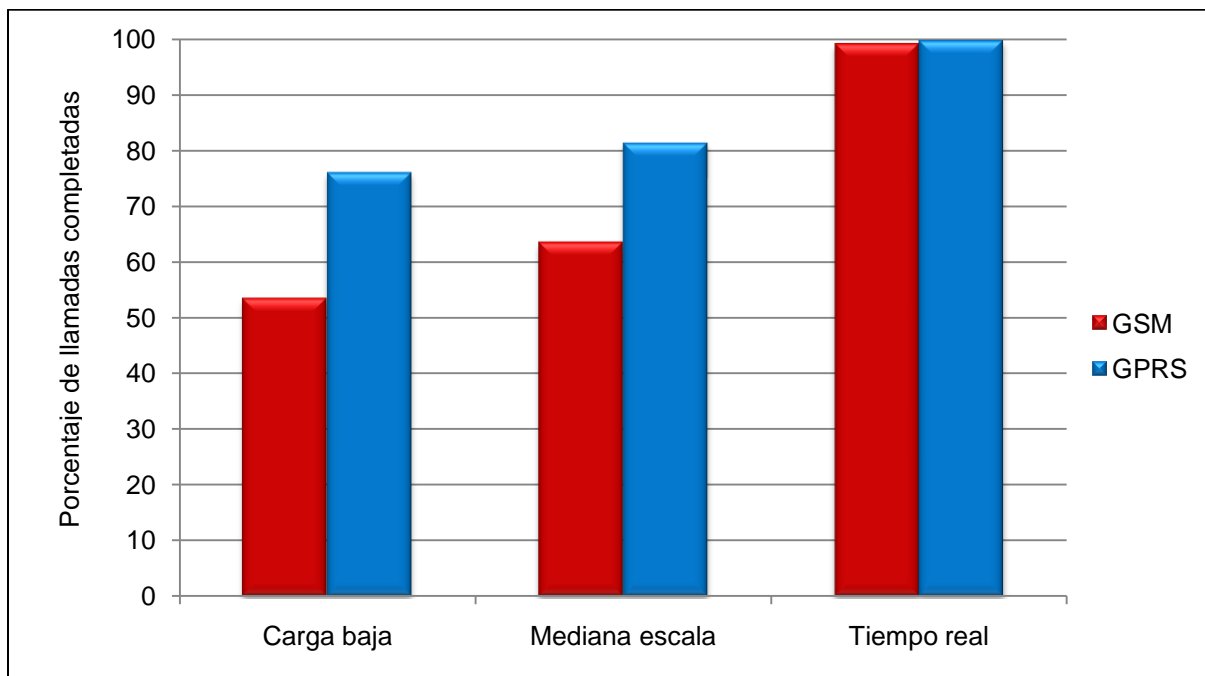


Figura 6. 5 Representación gráfica del promedio de acceso general para cada escenario de aplicación con los protocolos GSM y GPRS.

Para la síntesis de los resultados de acceso del nodo CRTECMOTE, se promediaron los porcentajes obtenidos, tal como se muestra en la tabla 6.15, resultando gráficamente como la figura 6.6 lo presenta.

Tabla 6. 15 Porcentajes promedio de llamadas completadas del nodo CRTECMOTE para cada escenario de aplicación con los protocolos GSM y GPRS.

Escenario de aplicación	% Llamadas completadas	
	GSM	GPRS
Carga baja	96.55	98.72
Mediana escala	97.43	99.76
Tiempo real	99.16	99.95

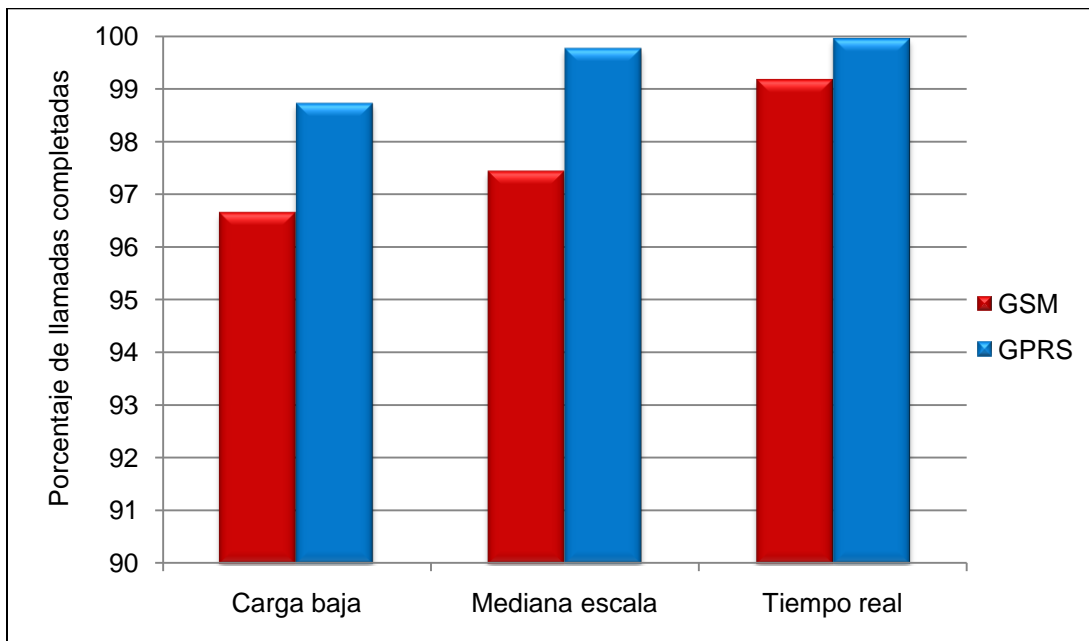


Figura 6. 6 Representación gráfica del promedio de acceso del nodo CRTECMOTE para cada escenario de aplicación con los protocolos GSM y GPRS.

6.1.3.4. Resultados obtenidos de la potencia del enlace en GSM y GPRS

En la sección 5.2.1.d se describe que para establecer la conexión con una BTS el móvil debe encontrarse a una cierta distancia de la torre de manera que la potencia del enlace sea suficiente para transmitir información.

En las figuras 6.7, 6.8 y 6.9 se muestran gráficamente los resultados obtenidos para el comportamiento de la potencia de enlace entre las BTS del plano y los distintos MS intentando acceder según su posición.

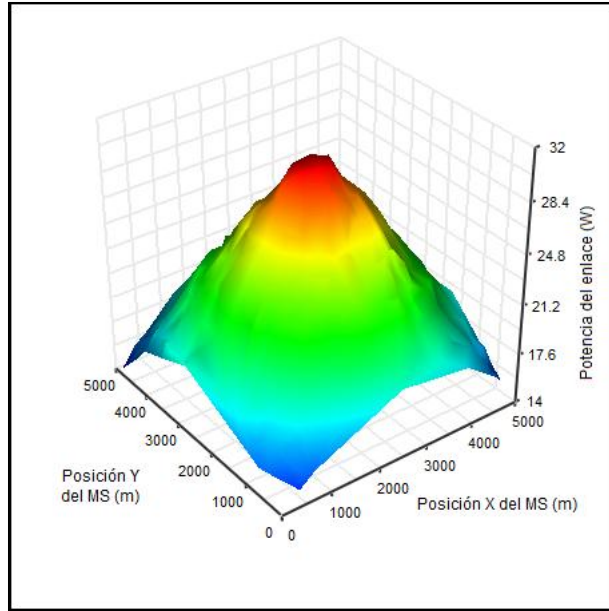


Figura 6. 7 Gráfica del comportamiento de la potencia del enlace para la BTS 0.

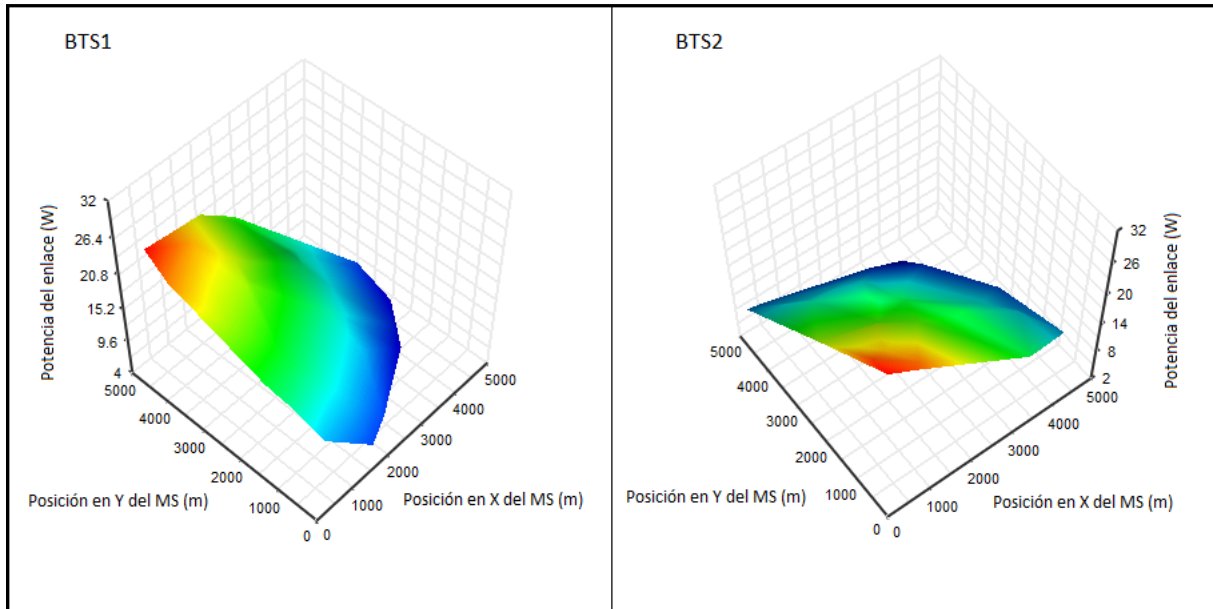


Figura 6. 8 Gráfica del comportamiento de la potencia del enlace para las BTS 1 y 2.

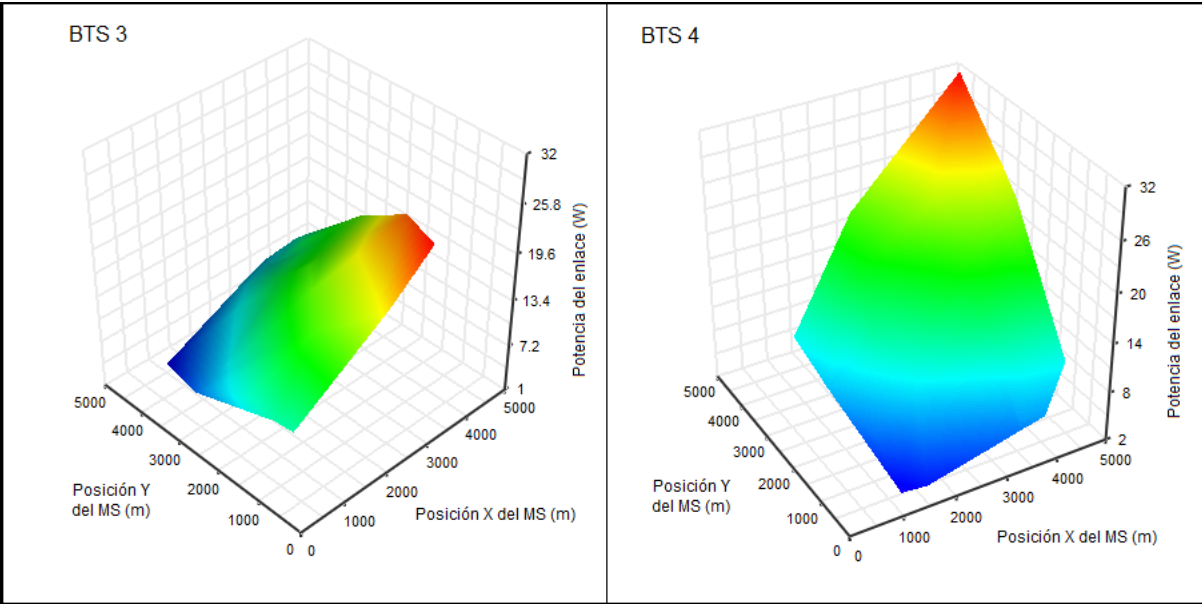


Figura 6. 9 Gráfica del comportamiento de la potencia del enlace para las BTS 3 y 4.

6.2. Análisis de Resultados

La primera etapa para el desarrollo de la solución consistió en la selección del protocolo a implementar con el fin de mejorar la calidad en la transmisión de datos de la red CRTECMOTE hacia redes externas. Dado que uno de los requisitos principales para seleccionar dicho protocolo consistía en reutilizar el equipo de comunicación disponible, se tomó en cuenta únicamente los protocolos que se ajustaran a las características de transmisión de información de dicho equipo. Como se menciona en la sección 3.1 la operación de transmisión soportada por el módem incluye únicamente los protocolos GSM, GPRS, EDGE ó SMS.

Los protocolos GSM y SMS ya estaban siendo utilizados por la red CRTECMOTE, pero la baja velocidad de transferencia limita la cantidad de servicios que pudieran ofrecer. Además, tomando en cuenta que estos utilizan un pago por tiempo de conexión, los costos del servicio resultan elevados. La combinación de estos factores negativos hace que GSM sea una tecnología mayoritariamente utilizada para la voz y no para los datos, lo cual confirma que para la red CRTECMOTE el uso de GSM para la transferencia de datos disminuye la eficiencia del sistema.

De los dos protocolos disponibles para utilizar con el mismo hardware, GPRS y EDGE, se investigó las características de ambos en cuanto a arquitectura requerida, capacidad de transmisión y mejoras sobre GSM. Se decide trabajar con GPRS por las siguientes razones:

- Permite reutilizar la mayoría de la arquitectura GSM, lo que en términos de la simulación propuesta es muy conveniente. Solamente se requirió incluir algunos elementos nuevos de la arquitectura GPRS, mientras que todo el bloque BSS de GSM se pudo conservar.
- La implementación de EDGE hubiera requerido además de agregar nuevos elementos a la arquitectura simulada con OMNET++, la modificación de los ya creados para simular GSM. Esto porque los bloques BSC, BTS e incluso MS deben contener características de transmisión que puedan soportar EDGE, es decir, diferentes transceptores, entre otras modificaciones.
- La velocidad de transferencia de datos es de hasta 115kbps para GPRS mientras que para GSM es de 9.6kbps. EDGE proporciona velocidades mucho mayores para la transferencia de datos, pero no se pudo encontrar información sobre si este servicio existe dentro de los que ofrece el ICE ni sobre sus posibles costos.

Una vez que se decidió trabajar con GPRS como nuevo protocolo, ya que permite reutilizar el equipo de comunicación disponible, se debía comprobar que también cumplía el requisito de disminuir el costo económico obtenido con GSM al realizar la transferencia de datos. Para comprobar esto se investigó los costos asociados a cada uno de los servicios ofrecidos por el ICE, tal como se menciona en la sección 6.1.1. Los costos se expanden para cada uno de los tres escenarios de aplicación definidos para representar las cargas de trabajo del nodo CRTECMOTE, y tal como se observa en la tabla 6.1 se comprueba que según lo investigado, los costos para la transmisión de datos con GPRS son menores que los de GSM en aproximadamente un 42.3%.

Para comprobar que GPRS cumple los requisitos de complejidad de implementación y confiabilidad de transmisión, se implementaron las arquitecturas de

GSM y GPRS, así como las funciones básicas de los protocolos, con el fin de comparar los resultados obtenidos con ambos.

Primeramente se realizó la parametrización de los escenarios de aplicación definidos previamente en la tabla 5.1, para poder simularlos con las clases creadas en OMNET++. Los parámetros que permiten la simulación se detallan en la sección 6.1.2, para lo que además se define un plano de simulación tal como se muestra en la figura 6.1, el cual cubre un área de 25km² centrada en las instalaciones del ICTR en Cartago, ubicación actual de la red CRTECMOTE. Se definen además dos casos de acceso que permiten evaluar el acceso logrado por el nodo CRTECMOTE a los servicios GSM/GPRS compitiendo por los recursos con otros usuarios, como se estipula en la realidad. La figura 6.2 presenta el escenario de simulación obtenido para la cantidad de 500 usuarios seleccionada, y que muestra la gran densidad contra la que compite el nodo CRTECMOTE en el acceso a los servicios de telefonía.

Para la simulación se utilizó la herramienta OMNET++ ya que posee bastante documentación y soporte enfocado principalmente en la simulación de redes tanto alámbricas e inalámbricas. De proyectos para OMNET++ se encontró una implementación previa del protocolo GSM realizada en el año 2004, que se encontraba bastante desactualizada con respecto a las capacidades de la última versión de OMNET++, por lo cual se utilizó como referencia para la simulación del acceso del nodo CRTECMOTE a los servicios GSM compitiendo por los recursos con otros usuarios. Se realizó modificaciones a las clases que poseía la implementación de GSM, tal que se pudieran obtener datos estadísticos del acceso a los recursos por todos los móviles, y además se crearon nuevas clases para los elementos BSC y MSC de la arquitectura que dicha implementación no poseía. Se agregó también, por medio del uso de las clases de la plataforma INET, funciones de movilidad para los MS, permitiendo definir posiciones fijas o aleatorias para ellos, así como tipos de movilidad, que para el caso de este proyecto se eligió movilidad lineal para los usuarios distintos del nodo CRTECMOTE, y movilidad nula para este último. Se presenta la figura 6.3 con un diagrama de la red GSM simulada para una cantidad de usuarios pequeña con el fin de poder apreciar como la herramienta OMNET++ realiza las conexiones de todas las clases y transforma la simulación para el escenario seleccionado.

En la simulación de GPRS fue posible reutilizar la mayoría de las clases creadas para GSM, inclusive las de movilidad aplicadas a los MS. Las únicas modificaciones requeridas consistieron en la sustitución del MSC de GSM por elementos específicos de la arquitectura GPRS: los nodos SGSN y GGSN, además de incluir en la clase BSC conexiones e interacción con la clase SGSN. La figura 6.4 muestra la red de conexiones obtenida de la simulación con OMNET++ para una red pequeña utilizando GPRS, se observa la conexión de todos los elementos de la arquitectura.

Ambas simulaciones creadas representan funciones simplificadas de los protocolos GSM y GPRS, las cuales se muestran en las figuras 5.8 y 5.11 respectivamente. Las funciones implementadas fueron seleccionadas porque permiten simular y evaluar el comportamiento de los MS en el acceso a los servicios de GSM y GPRS, además del manejo de los recursos de cada plataforma para atender cada solicitud de conexión para la transmisión de información y que tan estable es la conexión una vez establecida.

Las tablas 6.2, 6.4 y 6.6 muestran los resultados obtenidos para cada escenario de aplicación simulado utilizando GSM, de los cuales se puede observar cómo, en general, el porcentaje de llamadas completadas para el caso de acceso #1 en el que todos los usuarios solicitan conexión al mismo tiempo, es menor que para el caso de acceso #2, en donde solamente 100 usuarios solicitan los recursos al mismo tiempo. Es evidente como la congestión en el uso de los recursos provocada por la gran cantidad de solicitudes, saturan el acceso provocando la caída y pérdida de llamadas. Las tablas 6.3, 6.5 y 6.7 presentan los resultados obtenidos del acceso solo para el nodo CRTECMOTE en cada escenario; de ellas se puede observar como la efectividad en el acceso a los servicios GSM disminuye solamente cuando compite con otros usuarios, ya que dada su ubicación fija y movilidad nula, esto le genera mayor estabilidad una vez establecida la conexión.

De la simulación del protocolo GPRS se obtuvo los resultados mostrados en las tablas 6.8, 6.10 y 6.12, donde se muestran los porcentajes de llamadas completadas para cada escenario de aplicación, y que al igual que con GSM, el rendimiento es menor cuando la densidad de usuarios solicitando los recursos es mayor. La tasa de

éxito al hacer handover con GPRS es mayor que la obtenida con GSM, lo cual indica que la administración de los recursos es mejor, dado que las sesiones de transferencia de datos para los usuarios se reutilizan y no necesitan crear una nueva sesión y solicitar nuevamente los recursos, como sucede con GSM. Las tablas 6.9, 6.11 y 6.13 presentan los resultados obtenidos para el caso del nodo CRTECMOTE, donde se observa que el número de handovers (cambio de BTS) es igual al obtenido con GSM, y que se debe solamente al conflicto creado en el acceso a los recursos cuando se satura por la cantidad de usuarios. También se observa que los porcentajes de llamadas completadas siguen el mismo patrón de acceso que con GSM, pero con un mejor rendimiento.

Los resultados mostrados en la tabla 6.14 y figura 6.5, muestran los porcentajes promedio del acceso efectivo general logrado (llamadas completadas) para cada protocolo, y donde se puede inferir que la tasa de acceso y la tasa de conexiones exitosas logradas son mayores para GPRS. Esto confirma parte de las capacidades conocidas del protocolo, en donde una vez establecida la conexión los servicios serán reservados para el móvil para la transferencia de datos cuando se desee, mientras que con GSM la transferencia de datos es inestable, requiriendo el reinicio de la sesión con cada nueva transferencia y donde se observan también los defectos de conectividad del servicio.

A partir los resultados obtenidos para el acceso del nodo CRTECMOTE en cada escenario de aplicación, los cuales se sintetizan en la tabla 6.15 y figura 6.6, se observa que sigue el comportamiento general obteniendo una mejor tasa al utilizar el protocolo GPRS, lo cual implica que de los paquetes de datos a transmitir en su mayoría pudieron ser procesados satisfactoriamente a pesar de competir por el uso de los servicios con el resto de los usuarios. Esto confirma como el uso del protocolo GPRS es más confiable para la transferencia de datos, en especial cuando se trata de grandes cantidades de información.

Parte de los resultados de las simulaciones de los protocolos GSM y GPRS fueron estadísticas sobre el comportamiento de la potencia del enlace para cada BTS del plano de simulación con relación a la posición en X y Y de los MS tratando de

realizar una llamada. Se obtuvo resultados para los tres escenarios de aplicación en ambos protocolos, lo que produjo una amplia cantidad de datos para analizar, los cuales con el objetivo de visualizar mejor la variación de la potencia del enlace con respecto a la posición del MS, se decide presentarlos para cada BTS por separado, por medio de gráficos en 3D donde el plano Z representa la potencia del enlace entre la BTS y el MS; los ejes X y Y representan el plano de posicionamiento del MS. Las figuras 6.7, 6.8 y 6.9 muestran los gráficos en 3D para la BTS 0 en (2500, 2500), BTS 1 en (0, 5000), BTS 2 en (0, 0), BTS 3 en (5000, 0) y BTS 4 en (5000, 5000), respectivamente. En dichas figuras se observa como la potencia del enlace será mayor y cercana al máximo de potencia establecido para las BTS de 32W, conforme más cerca este el MS de la BTS (sector rojo del gráfico); y cómo la potencia va disminuyendo conforme la ubicación del MS sea más alejada de cada BTS, hasta llegar al mínimo de potencia (sector azul del gráfico) con el cual no será posible establecer un conexión. La distancia máxima entre MS y BTS para poder establecer conexión es de 6.4km.

Los resultados de la potencia del enlace permiten visualizar la importancia que tiene la ubicación del nodo CRTECMOTE dentro del plano en términos de la capacidad de los servicios que podrá acceder al establecer conexión con una BTS, lo cual dependerá no solamente de su posición (que define la potencia del enlace), sino también de los TimeSlots que tenga disponibles la BTS en el instante de la solicitud. Esto lleva a tomar en consideración la posición fija seleccionada para el establecimiento de la red CRTECMOTE con respecto al acceso a los servicios de una BTS, así como también la densidad de usuarios del área en la que se ubicará la red.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1. Conclusiones

1. Se comprueba a través de las simulaciones que GPRS es un servicio de datos basado en paquetes que proporciona un mejor rendimiento en la transferencia de datos, en cuanto a confiabilidad del enlace, costo e implementación, que el ofrecido por GSM.
2. De acuerdo a la simulación del protocolo GPRS, se establece que puede haber una reducción del costo económico de la transmisión de datos para la red CRTECMOTE de hasta un 42.3%, respecto al costo original al utilizar el protocolo GSM.
3. La baja velocidad en la transferencia de datos limitan la cantidad de servicios y efectividad de los protocolos GSM y SMS, esto según los requerimientos de la red CRTECMOTE.
4. La ubicación espacial dada al nodo de la red CRTECMOTE debe tomar en consideración tanto la cercanía con las torres BTS del ICE, para lograr una potencia de enlace suficiente para establecer conexión, como la densidad de usuarios del servicio de telefonía del área.
5. La potencia de enlace entre un MS y una BTS depende de la distancia de separación entre ambos. El radio de alcance y la potencia máxima de transmisión de la BTS definen la distancia máxima a la que se puede ubicar un MS para poder establecer conexión con dicha BTS.
6. Entre mayor sea la densidad de tráfico, debido al número de usuarios en la celda, solicitando acceso a los servicios de telefonía (ya sea GSM o GPRS), mayor será la probabilidad de no poder establecer conexión y completar satisfactoriamente la llamada o transferencia de datos.
7. La simulación de escenarios de aplicación para la red CRTECMOTE con el uso de diferentes protocolos permite crear un respaldo teórico del comportamiento

logrado en la realidad y proceder con mayor seguridad en la implementación física del protocolo deseado según los resultados obtenidos.

7.2. Recomendaciones

1. La modificación del equipo de comunicación de la red CRTECMOTE permitiría la implementación y uso de diferentes protocolos de comunicación con mejor rendimiento que el logrado con GPRS, tales como EDGE, 3G, Zigbee, entre otros. Debe equilibrarse la prioridad entre el costo de implementación y la calidad de transmisión.
2. El uso de servicios de telefonía de tercera generación puede proporcionar el acceso de la red CRTECMOTE a servicios multimedia no disponibles previamente con el uso de los protocolos GSM/GPRS, los cuales se podrían aprovechar para agregar nuevas capacidades en la transmisión y exposición de la información recolectada por la red de sensores.
3. Se recomienda explorar más abiertamente la herramienta de simulación OMNET++, así como otras plataformas basadas en ella, y aprovechar las capacidades que se ofrecen para la simulación de redes inalámbricas con el fin de visualizar el alcance y viabilidad de otros protocolos a implementar en la red CRTECMOTE.
4. En las simulaciones realizadas en el presente proyecto se estipula un escenario ideal donde el terreno es plano y hay línea vista de las BTS a los MS; para simulaciones más reales se recomienda analizar el relieve y las obstrucciones que podría tener el terreno y que afectarían la transferencia de datos para la red CRTECMOTE.

Bibliografía

- [1] Carvajal Godínez, Johan. “*Diseño de un nodo con arquitectura abierta para aplicación con redes inalámbricas de sensores (CRTECMOTE)*”. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2008.
- [2] Rodríguez R., Dennis. “*Organización de la información generada por una red inalámbrica de sensores: Load Point CRTECMOTE*”. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2010.
- [3] Holger Karl, Andreas Willing. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2005.
- [4] Ingeniería de telecomunicaciones. “*GSM: Sistema Global para las comunicaciones móviles*”. Universidad Nacional Experimental De La Fuerza Armada. República Bolivariana de Venezuela, 2011.
- [5] Sicard, E. *Introduction to GSM*. [En Línea]. Última modificación: 20 Septiembre 2001. Última visita: 7 Junio 2011. URL: <http://www.eetimes.com/design/communications-design/4018328/Introduction-to-GSM>
- [6] Romero Sánchez, Mario César; Stanford Anichiarico, Arturo. “*Simulación de un sistema de telefonía celular de tecnología GSM por medio de OMNET*”. Universidad El Bosque. Bogotá, Colombia, 2008.
- [7] Tanenbaum, Andrew S. *Redes de Computadoras. Capítulo 2.6 El Sistema Telefónico Móvil*. Cuarta Edición. México. Pearson Educación, 2003.
- [8] Rico Martínez, Mónica Andrea. “*Protocolo de Especificaciones de Gestión de Calidad en Redes de Telefonía en Colombia*”. Universidad Industrial de Santander. Colombia, 2008.
- [9] Sistemas de Comunicaciones Móviles. *Sistemas Móviles GSM*. Universidad Nacional de Rosario. Argentina, Octubre 2002. Última visita: 8 junio 2011. URL: [http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Tecnologias%20de%20banda%20angosta/Sistemas%20de%20comunicaciones%20m%F3viles%20\(GSM\).pdf](http://www.eie.fceia.unr.edu.ar/ftp/Tecnologias%20de%20banda%20angosta/Sistemas%20de%20comunicaciones%20m%F3viles%20(GSM).pdf)
- [10] Nokia. *GSM Architecture: Training Document*. Finlandia, 2002. URL: http://www.roggeweck.net/uploads/media/Student_-_GSM_Architecture.pdf
- [11] Tecnología GSM [En Línea] Última visita: 8 Junio 2011. URL: <http://www.todo-cel.com.ar/info/gsm.html#2>

- [12] 3GPP2. Short Message Service. [En Línea] Última visita: 9 Junio 2011. URL: http://www.3gpp2.org/public_html/specs/CS0015-0.pdf
- [13] Sistema GPRS. [En Línea] Última visita: 10 Junio 2011. URL: www.uv.es/montanan/redes/trabajos/GPRS.doc
- [14] Nokia. *GPRS Architecture: Interfaces and Protocols*. 2004. URL: http://www.roggeweck.net/uploads/media/Student_-_GPRS_Architecture.pdf
- [15] OMNET++, Omnet++ Community Site. [En Línea] URL: <http://www.omnetpp.org>
- [16] Fonseca Porras, Miguel Ángel. “*Desarrollo de un sistema convertidor de protocolos para comunicación inalámbrica vía GSM*”. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2010.
- [17] INET Framework [En Línea] Última visita: 12 junio 2011. URL: <http://inet.omnetpp.org/>
- [18] GSM Protocol Diagrams: Origination Call [En Línea] URL: <http://www.eventhelix.com/gsm/originating-call/>
- [19] GPRS Protocol Diagrams: PDP Context Activation [En Línea] URL: http://www.eventhelix.com/RealtimeMantra/Telecom/#GSM_GPRS_Sequence_Diagrams_
- [20] K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi, and G.J. Pottie. Protocols for Self-Organization of a Wireless Sensor Network. *IEEE Personal Communications*, 2000.
- [21] V. Rajendran, K. Obraczka, and J.J. Garcia-Luna-Aceves. Energy-Efficient, Collision-Free Medium Access Control for Wireless Sensor Networks. *In Proceedings of ACM SenSys03*, 2003.
- [22] Md. Abdur Rahman, Abdulmotaleb El Saddik, Wail Gueaieb. *Wireless Sensor Network Transport Layer: State of the Art*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.
- [23] Akan O, Akyildizl. Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2005.
- [24] Iyer Y.G, Gandham S, Venkatesan S. STCP: A generic transport layer protocol for wireless sensor networks. In: *Proc. IEEE ICCCN*. USA. 2005.
- [25] Tezcan N, Wang W. ART: an asymmetric and reliable transport mechanism for wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*. 2007.
- [26] Lu C, Blum B, Abdelzaher T, Stankovic J, He T. RAP: A Real-Time Communication Architecture for Large-Scale Wireless Sensor Networks, In: *Proc. IEEE RTAS*. 2002
- [27] Jamal N. Al-Karaki, Ahmed E. Kamal. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. *IEEE Wireless Communications*. 2004

Apéndices

A.1. Hoja de Información del Proyecto

Información del estudiante:

Nombre: Sofía Ortiz Argüello

Cédula: 113290538

Carné ITCR: 200532345

Dirección de su residencia en época lectiva: Santa Lucía, Barva, Heredia

Dirección de su residencia en época no lectiva: IDEM

Teléfono en época lectiva: 2262-7461

Teléfono época no lectiva: IDEM

Email: sofcr05@gmail.com

Fax: N/A

Información del proyecto:

Nombre del Proyecto: Optimización del protocolo de comunicación utilizado por la Red Inalámbrica de Sensores: Arquitectura Abierta CRTECMOTE

Área del Proyecto: Comunicaciones, Electrónica Digital, Programación

Información de la institución:

Nombre: Instituto Tecnológico de Costa Rica

Zona: Campus Sede Central

Dirección: Los Ángeles, Cartago

Teléfono: 2552-5333

Fax: 2551-5348

Apartado: 159-7050 Cartago, Costa Rica

Actividad Principal: Academia

Información del encargado en la institución:

Nombre: Johan Carvajal Godínez

Puesto que ocupa: Profesor Universitario, Investigador

Departamento: Escuela de Ingeniería Electrónica

Profesión: Ingeniero Electrónico **Grado académico:** Licenciatura

Teléfono: 25509171

Email: johcarvajal@itcr.ac.cr

A.2. Interfaces entre sistemas para GSM, [6]

- Interfaz Radio (Interfaz UM): es utilizada por las estaciones móviles para acceder a todos los servicios y facilidades del sistema GSM, utilizando para ello los sistemas de estación base como punto de conexión con la red.
- Interfaz entre la SMC y el BSS (interfaz A): se utiliza fundamentalmente para el intercambio de información relacionada con las funciones de Gestión del BSS, Manejo de la llamada, y Gestión de la movilidad.
- Interfaz entre el BSC y la BTS (interfaz A-bis): permite conectar de una forma normalizada las estaciones base y los controladores de estación base, independientemente de que sean realizadas por un mismo suministrador o por suministradores diferentes.
- Interfaz entre la SMC y el VLR Asociado (interfaz B): permite la gestión y seguimiento de los móviles registrados en el VLR dentro del área controlada por su SMC asociada(s).
- Interfaz entre el HLR y la SMC (interfaz C): Al final de una llamada en la que un móvil tiene que ser tarificado, la SMC de ese móvil puede enviar un mensaje de tarificación al HLR. Cuando la red fija no puede realizar el procedimiento de interrogación necesario para el establecimiento de una llamada hacia un usuario móvil, la SMC de cabecera debe interrogar al HLR del usuario llamado para conocer el número de seguimiento del móvil llamado.
- Interfaz entre el HLR y el VLR (interfaz D): se utiliza para intercambiar los datos relacionados con la posición de la estación móvil y los datos de suscripción del usuario. A través de esta interfaz el VLR informa al HLR correspondiente, de la posición de una estación móvil gestionada por este último registro, proporcionándole un número de seguimiento a fin de que pueda encaminar las llamadas dirigidas hacia esta estación móvil.
- Interfaz entre SMC (interfaz E): cuando una estación se desplaza del área controlada por una SMC al área de otra SMC distinta, es necesario realizar un procedimiento de traspaso para poder continuar la conversación. En este caso las

SMC deben intercambiar datos utilizando esta interfaz para poder llevar a cabo la operación.

En la figura A se muestran las diferentes interfaces que comunican cada elemento del sistema GSM, según se describió anteriormente.

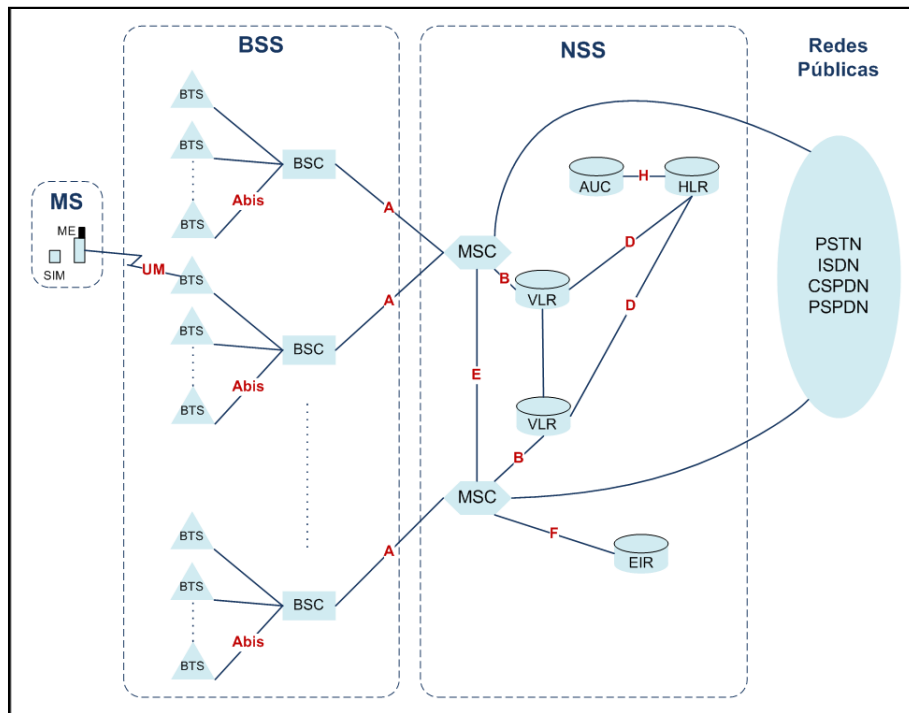


Figura A Diagrama de interfaces entre los elementos del sistema GSM.

A.3. Interfaces entre sistemas para GPRS

El sistema GPRS introduce nuevas interfaces a la red GSM. La figura B ilustra la arquitectura lógica con las interfaces y puntos de referencia de la red GSM-GPRS combinada.

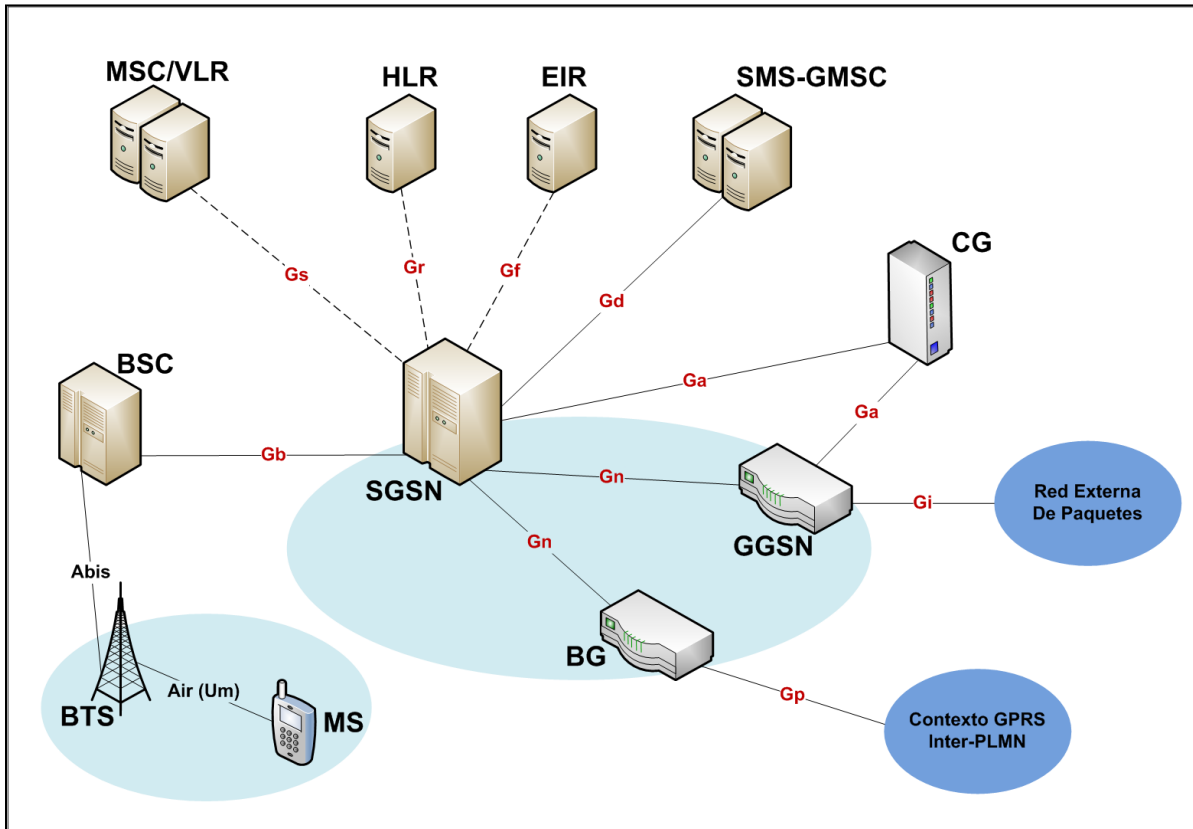


Figura B Diagrama de interfaces entre elementos de la red GSM/GPRS.

- Interfaz entre MS y la parte fija de la red GPRS (interfaz Um): es la interfaz de acceso que usa el MS para acceder a la red GPRS. La interfaz de radio a la BTS es la misma interfaz usada por la red GSM existente con algunos cambios específicos de GPRS.
- Interfaz entre SGSN y BSS (interfaz Gb): lleva el tráfico GPRS y la señalización entre la red de radio GSM (BSS) y la red GPRS.
- Interfaz entre GSNs de la misma PLMN (interfaz Gn): provee una interfaz de datos y de señalización en la plataforma intra-PLMN. El Protocolo GPRS Túnel es usado en la interfaz Gn sobre la plataforma de la red basada en IP.

- Interfaz entre GSNs y varios PLMNs (interfaz Gp): provee la misma funcionalidad que la interfaz Gn, pero además junto con la BG y el Firewall, agrega las funciones necesarias para la creación de redes intra-PLMN, como seguridad, enrutamiento, entre otras.
- Interfaz entre SGSN y HLR (interfaz Gr): da al SGSN acceso a la información del suscriptor dentro del HLR. El HLR puede estar ubicado en una PLMN diferente que el SGSN.
- Interfaz entre GSNs y el CG dentro de la misma PLMN (interfaz Ga): proporciona una interfaz de datos y señalización. La interfaz es usada para enviar records de información de cobro generados por los GSNs al CG.
- Interfaz entre el SGSN y el MSC (interfaz Gs): El SGSN puede enviar información de la ubicación al MSC o recibir solicitudes de paginación del SMC a través de esta interfaz opcional. Esta interfaz puede incrementar grandemente la eficiencia de los recursos de red y radio en el sistema GSM/GPRS combinado.
- Interfaz entre el SGSN y el EIR (interfaz Gf): proporciona al SGSN acceso a la información de los dispositivos GPRS de los usuarios. El EIR mantiene tres diferentes listas de dispositivos: lista negra para móviles robados, lista gris para móviles bajo observación y lista blanca para los otros móviles.
- Interfaz entre el GGSN y el HLR (interfaz Gc): El GGSN podría solicitar la ubicación de un MS a través de esta interfaz opcional. La interfaz puede ser usada si el GGSN necesita redirigir paquetes a un MS que no está activo.