



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro de Investigación en Computación

APLICACIÓN DEL CLASIFICADOR GAMMA EN EL
ALGORITMO HANDOFF EMPLEADO EN LA COMUNICACIÓN
CELULAR

TESIS

Que para obtener el grado de Maestro
en Ciencias de la Computación

PRESENTA:

Juan Carlos Rivera Azamar

Directores de Tesis

Dr. Amadeo José Argüelles Cruz
Dr. Oscar Camacho Nieto



MÉXICO, D. F.

NOVIEMBRE DE 2012



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 10:00 horas del día 05 del mes de Noviembre de 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del:

Centro de Investigación en Computación

para examinar la tesis titulada:

“Aplicación del clasificador Gamma en el algoritmo Handoff empleado en la comunicación celular”

Presentada por el alumno:

RIVERA

Apellido paterno

AZAMAR

Apellido materno

JUAN CARLOS

Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	1	6	6	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de Tesis

Dr. Amadeo José Argüelles Cruz

Dr. Oscar Camacho Nieto

Dr. Oleksiy Pogrebnyak

Dr. Cornelio Yáñez Márquez

Dr. Luis Octavio López Leyva

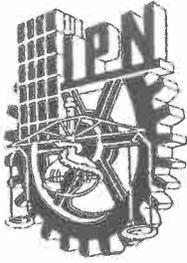
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Luis Alfonso Villalva Vargas



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 8 del mes noviembre del año 2012, el (la) que suscribe Juan Carlos Rivera Azamar alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias de la Computación con número de registro B101661, adscrito al Centro de Investigación en Computación, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Amadeo José Argüelles Cruz y Dr. Oscar Camacho Nieto y cede los derechos del trabajo intitulado Aplicación del Clasificador Gamma en el Algoritmo Handoff Empleado en la Comunicación Celular, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección jcrivera@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Juan Carlos Rivera Azamar

Nombre y firma

Resumen

El presente trabajo de tesis, analiza la implementación de un algoritmo de predicción en el sistema de handoff de las telecomunicaciones. El modelo de predicción propuesto utiliza las ventajas del Clasificador Gamma para clasificar, a través del proceso handoff, parámetros que ayudan a la predicción de la siguiente celda de conexión del usuario móvil.

Se aplicó el método 10-fold cross validation a los datos usados en este estudio, en el cual se obtuvo hasta un 100 % en la recuperación de los patrones. Los resultados presentados en la aplicación del método, considerando los estándares internacionales, reducen la cantidad de ejecuciones de handoffs para las trayectorias definidas, además de utilizar como parámetros de decisión, a la fuerza de la señal recibida (RSS) y un historial de trayectoria del móvil (de días anteriores a la predicción). La aplicación del Clasificador Gamma en el proceso handoff muestra un rendimiento efectivo, confiable y superior en comparación al método tradicional de RSS.

Abstract

The thesis analyses the implementation of a prediction algorithm in the handoff telecommunications system. The proposed prediction model uses the Gamma Classifier algorithm advantages in order to classify, through the handoff process, parameters that help to predict the next connection cell for the mobile user.

Validation tests like 10-Fold Cross method was applied over the data used in this study, where up to 100% recovery was obtained. Results reported in the application of the method, considering international standards, reduce the amount of handoff executions for the defined trajectories, which uses the Received Signal Strength (RSS) and a trajectory history (of previous days before the prediction) of the mobile user as decision criterions. The use of the Gamma classifier in the handoff process exhibits an effective, reliable and superior performance over the traditional RSS method.

Agradecimientos

Agradezco a mi madre, Laura Azamar Tapia, por todo su apoyo a lo largo de esta etapa de mi vida. Gracias a sus enseñanzas y valores, ahora arraigados en mí, me es posible cumplir con los objetivos que me propongo y culminarlos satisfactoriamente.

Gracias a mis hermanos, Claudia, Ximena y Oscar, por su apoyo y compañía en los momentos difíciles que se presentaron, y que al final fueron superados para conseguir este nuevo logro en mi vida profesional.

Agradezco a mi novia, Esmeralda, por todo su apoyo incondicional que me brindó en una de las etapas más importantes de mi carrera profesional. Gracias por tus consejos, paciencia y aliento que fueron determinantes para poder llevar este trabajo hasta el final. Gracias por mostrarme que las adversidades se superan también con un poco de fe.

Gracias a mis amigos, Viridiana y Moisés, por todo el apoyo y comprensión que me brindaron durante la maestría. Gracias por toda la compañía, los días y noches de arduo trabajo y de momentos agradables que vivimos en nuestra estancia en el CIC.

Agradezco a mis directores de tesis, Dr. Amadeo José Argüelles Cruz y Dr. Oscar Camacho Nieto, por su apoyo, comprensión y los consejos que me brindaron durante la maestría.

Agradezco al Instituto Politécnico Nacional y al Centro de Investigación en Computación (CIC). Por haberme brindado la oportunidad de estudiar la Maestría en Ciencias en Computación.

Finalmente, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al ICyTDF (proyectos PIUTE 10-77 y PICSO 10-85), por su apoyo brindado durante mi estancia en el programa de maestría del CIC para el desarrollo de este trabajo.

Índice general

1. Introducción	10
1.1. Antecedentes	10
1.2. Justificación	12
1.3. Objetivo General	12
1.4. Objetivos Específicos	12
1.5. Estructura de la Tesis	13
2. Estado del Arte	14
2.1. Comunicaciones inalámbricas y handoff	14
2.1.1. Conceptos básicos de telefonía celular y handoff	14
2.1.2. El Algoritmo de handoff	18
2.1.3. Handoff	18
2.2. Conceptos Básicos de Memorias Asociativas	20
2.2.1. Memorias Asociativas	22
2.2.2. Memorias asociativas Alfa-Beta	22
2.2.2.1. Operaciones binarias α y β : definiciones y propiedades	22
2.2.2.2. Memorias Heteroasociativas Alfa-Beta	23
2.2.2.3. Memorias Autoasociativas Alfa-Beta	25
3. Materiales y Métodos	29
3.1. Descripción del Clasificador Gamma	29
3.1.1. Operador Gamma de Similitud	29
3.1.2. Algoritmo del Clasificador Gamma	30
3.2. Parámetros de medición del algoritmo handoff	32
3.2.1. Nivel de Señal	35
3.2.1.1. Precisión absoluta	35
3.2.1.2. Precisión relativa	35
3.2.2. Calidad de la Señal	36
3.2.2.1. Parámetros físicos	36
3.2.2.2. Intervalo de parámetros RXQUAL	37
3.2.3. Descripción del protocolo de comunicación	37
4. Modelo Propuesto	38
4.1. Descripción de los patrones de entrada y predicción	38
4.1.1. Descripción del conjunto fundamental	40
4.1.2. Descripción del conjunto de prueba	41
4.2. Algoritmo de predicción de handoff propuesto	43
4.3. Métodos de validación	47

5. Resultados	49
5.1. Condiciones y parámetros de prueba	49
5.2. Pruebas de predicción con el algoritmo handoff propuesto	50
5.2.1. Resultados de las pruebas de validación del Clasificador Gamma	51
5.2.2. Resultados de la predicción realizada con el algoritmo propuesto	52
5.3. Análisis de las predicciones realizadas	58
5.4. Análisis del desempeño computacional	59
5.5. Interpretación de las gráficas	60
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	61
6.1. Conclusiones	61
6.2. Trabajo a Futuro	62
Referencias	65

Índice de figuras

2.1. Cobertura de una estación base.	15
2.2. Configuración estructural de una red celular	15
2.3. Componentes de la red GSM.	17
2.4. Handoff por cambio de estación base (BS)	17
2.5. Esquema de una memoria asociativa.	20
3.1. Diagrama de bloques del algoritmo del Clasificador Gamma generalizado	31
3.2. Reporte de Mediciones de una estación móvil.	33
3.3. Valores de recepción de señal (RXLEV) y de calidad de señal (RXQUAL).	34
3.4. Niveles de señal afectado por la topografía.	34
3.5. Formato del código BSIC	34
4.1. Formato del código CGI.	39
4.2. Formato original del banco de datos aplicado al algoritmo propuesto.	40
4.3. Formato final del conjunto fundamental de la estación móvil antes de agregar la clase.	41
4.4. Diagrama de flujo para asignación de clases del conjunto fundamental	42
4.5. Formato final del conjunto Fundamental de la estación móvil con clases asignadas.	42
4.6. Formato de los patrones del conjunto de prueba.	43
4.7. Diagrama general del algoritmo propuesto.	45
4.8. Identificador de celda (CI) del conjunto fundamental.	46
4.9. Lectura datos de la celda actual.	46
4.10. CI celda actual y HO siguiente	47
4.11. CI probable para realizar el HO	47
5.1. Muestra de datos perteneciente a la estación móvil 1 del día 16 de enero de 2007.	51
5.2. Ejemplo de resultados de validación de clasificación por medio del análisis de 10 Fols Cross Validation para un conjunto fundamental de patrones formado por 7 días de mediciones.	52
5.3. Confrontación entre datos de handoff GSM real y datos predichos por el algoritmo propuesto para el día 18	53
5.4. Visualización de 50 instancias de los datos reales y predichos por el algoritmo para el día 18 de la trayectoria de la estación móvil.	53
5.5. Espectro amplio para comparar los datos de handoff GSM real y datos predichos para el día 19.	53
5.6. Acercamiento de 60 instancias entre los datos reales y predichos por el algoritmo para el día 19 de la trayectoria de la estación móvil.	54
5.7. Acercamiento de 110 instancias para comparar la trayectoria original con la trayectoria predicha para el día 19 de la trayectoria de la estación móvil. La trayectoria original ejecutan handoffs innecesarios y utiliza mayores recursos de la red GSM. La predicción evita esos cambios innecesarios y así ahorrar recursos de la red.	54

5.8. Comparación general de las instancias entre los bancos de datos originales y los datos de predicción del día 20 de la estación móvil.	55
5.9. Muestra específica que compara las instancias del banco de datos original contra el banco de datos predichos para el día 20 de la estación móvil.	55
5.10. Espectro general de muestras de las instancias para el día 22 entre los patrones originales y los patrones predichos de la estación móvil.	56
5.11. Ampliación de la confrontación de los datos entre la trayectoria original y los datos predichos de la estación móvil analizada para el día 22.	56
5.12. Comparación general entre la trayectoria de los datos originales y la trayectoria de los datos predichos de la estación móvil para el día 23.	57
5.13. Espectro específico de los datos de la trayectoria original y los patrones de la trayectoria predicha para el día 23 de la estación móvil.	57

Índice de tablas

2.1. Operación binaria $\alpha(A \times A) \rightarrow B$	22
2.2. Operación binaria $\beta(B \times A) \rightarrow A$	23
3.1. Parámetros relativos	35
3.2. Niveles de Sensibilidad de Referencia	36
3.3. Equivalencia de valores entre RXLEV y dBm	36
3.4. Traslación de valores de RXQUAL	37
5.1. Cardinalidad de los conjuntos fundamentales utilizados en las pruebas.	50
5.2. Ejemplos de aplicación del método 10-fold cross validation	51
5.3. Resumen de resultados obtenidos para 5 días distintos de predicción con diferente cardinalidad en el conjunto fundamental del algoritmo propuesto.	58
5.4. Tiempos de procesamiento del algoritmo de predicción handoff con el Clasificador Gamma.	60

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo de tesis se utiliza el modelo algorítmico del Clasificador Gamma para su aplicación en el proceso handoff de las comunicaciones inalámbricas, permitiendo con ello la transmisión de datos de una forma continua y con la calidad máxima posible en el servicio. cabe mencionar que en la actualidad existen este tipo de procesos pero se abordan con otro tipo de tecnologías, mismas que presentan deficiencias en la conservación de la calidad de comunicación debido a las mediciones en tiempo real que se realiza y las limitantes de recursos en las mismas redes, las cuales se minimizan con esta aportación y en consecuencia se ahorran recursos de la red. En el siguiente capítulo de antecedentes, se describirá un panorama del pasado y presente de los avances tecnológicos que dieron paso al desarrollo de la telefonía móvil y en específico del proceso handoff; además se presenta el panorama de las memorias asociativas pertenecientes a la rama del reconocimiento de patrones; y en conjunto éstos dos temas se unifican en el modelo propuesto.

1.1. Antecedentes

Las redes de comunicación inalámbrica se han convertido en la forma de comunicación de acceso global adquiriendo una gran popularidad en los últimos años, y en consecuencia, la demanda de este servicio ha crecido a pasos agigantados. Estos grandes avances no se hubieran alcanzado sin la idea de poder realizar una comunicación inalámbrica de manera masiva a un costo accesible para cualquier persona, tal y como se presentaba para las redes de telefonía alámbrica.

Los primeros conceptos de la posibilidad de crear una red celular hexagonal, surgieron en un laboratorio de investigación [1] de la compañía Bell, con el objetivo de utilizar mucho menos energía en el manejo de las comunicaciones. Varias pruebas se realizaron siguiendo esta línea de desarrollo pero con una falla importante, la comunicación se perdía al trasladar el dispositivo móvil de una celda a otra. Este problema se mantuvo hasta los años 70 cuando la solución fue desarrollada, de manera práctica con estaciones móviles dentro de una red celular [2], permitiendo a los teléfonos móviles moverse a través de múltiples áreas durante una sola conversación sin interrupción alguna; de esta manera el nuevo sistema fue nombrado handoff.

Subsecuentemente, la tecnología siguió avanzando dentro del desarrollo de las comunicaciones celulares pasando por diferentes etapas perfectamente distinguibles en la historia, las cuales son: la red 1G de primera generación que se implementó a nivel nacional en Japón en el año de 1979 y que en sus bases implementaban una tecnología puramente analógica; la red 2G de segunda generación representó un gran avance en las comunicaciones, ya que su principal característica fue la digitalización de la

tecnología. La red 2G surgió utilizando el estándar europeo llamado Global System for Mobile Communications (GSM) creado por el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI) [3]. Posteriormente surgió en el año de 2001 en Japón las redes 3G de tercera generación implementando la comunicación por medio de envío de paquetes de datos a través de una dirección IP (Internet Protocol) que permite distinguir los dispositivos móviles dentro de una red. Esta generación de comunicaciones se enfoca más en los requerimientos de la red y no de un cambio drástico en la tecnología [4]. En los años más recientes (2010), la tecnología 3G sufre cambios considerables, dando lugar a la creación del estándar LTE, al cual se le denomina 4G (norma 3GPP) [5]. Esta tecnología se basa completamente en la conmutación de paquetes IP para la comunicación (voz y datos).

Durante el crecimiento de las redes celulares, el sistema de handoff que se aborda principalmente en esta tesis, conservó sus características esenciales pero se fue adaptando al tipo de tecnología y a las necesidades que las redes requieren para proporcionar una comunicación continua a los usuarios. Los principales cambios que se realizaron, se observan en la forma en que se toma la decisión de aplicar un handoff, es decir, la manera en que se desarrolla el algoritmo de decisión handoff.

Existen diferentes métodos para la realización del algoritmo de decisión handoff, desde los más simples que se basan en las medidas de calidad en la señal de comunicación y realizan el cambio de celda justo en el momento que se presenta la degradación de la fuerza de la señal RSSI (Ratio Signal Strength Indications) o RSS [6], hasta los más elaborados que pretenden predecir la trayectoria del usuario para así decidir un cambio de celda antes de ser inevitable y necesario ese cambio. Por ello, en los últimos años se han realizado algoritmos que permitan realizar estas decisiones, basándose en la rama de la predicción por medio del reconocimiento de patrones. Dentro de este enfoque se encuentra el área de las memorias asociativas que permiten recuperar correctamente patrones completos a partir de patrones de entrada, los cuales pueden presentar alteraciones aditivas, sustractivas o combinadas [7].

En las recientes décadas las memorias asociativas se han desarrollado paralelamente a las Redes Neuronales, desde la concepción del primer modelo de neurona artificial [8], hasta los modelos de redes neuronales basados en conceptos modernos como la morfología matemática [9], pasando por los importantes trabajos de los pioneros en las redes neuronales tipo perceptron [10, 11, 12] y el modelo de Hopfield, quien en 1982 presenta al mundo su red neuronal que también funciona como una memoria asociativa [13]. Con este importante trabajo de investigación, Hopfield propició el resurgimiento de las redes neuronales después del período posterior a la publicación del libro «Perceptrons» [14], en donde los autores demostraron que el perceptron tenía severas limitaciones.

El primer modelo de memoria asociativa fue desarrollado por el científico alemán Karl Steinbuch que en 1961 desarrolla una memoria heteroasociativa que emplea patrones binarios para la clasificación: la Lernmatrix [15]. Después de un poco menos de una década Willshaw, Buneman y Longuet-Higgins presentan un dispositivo óptico elemental capaz de funcionar como una memoria asociativa llamada el Correlograph. En 1972, Anderson [16] y Kohonen [17] presentan el Linear Asociator de manera independiente. Diez años más tarde surge el modelo Hopfield ya mencionado con anterioridad.

En 1988 Bart Kosko [18] crea un modelo de memoria heteroasociativa, a partir de la memoria Hopfield con el objetivo de subsanar la desventaja de autoasociatividad de este último modelo, llamado memoria asociativa bidireccional BAM (Bidirectional Associative Memory), la cual se basa en un algoritmo iterativo como la de Hopfield. El problema de esta memoria radica en la muy baja capacidad de aprendizaje y recuperación de patrones al igual que la memoria Hopfield.

Siguiendo con los desarrollos de memorias, con los trabajos de Ritter y su equipo de investigación, se presenta otro avance importante en la búsqueda de mejorar el aprendizaje de las memorias y la recuperación de patrones. Ellos aplicaron los conceptos de morfología matemática y las redes neuro-

nales morfológicas [9] para así crear un nuevo tipo de memorias asociativas con mayor capacidad de aprendizaje y recuperación de patrones en comparación a los modelos existentes en ese momento.

Las memorias morfológicas crearon el camino para la creación de las memorias asociativas Alfa-Beta [19], desarrolladas por investigadores del Centro de Investigación en Computación del IPN en el año del 2002. Este modelo presenta las bases teóricas para la creación del Clasificador Gamma en el año 2007 [20] y el cual representa el modelo que se empleará en este trabajo de tesis.

1.2. Justificación

Hoy en día el acceso a la información y las comunicaciones forman parte esencial en las actividades de la vida cotidiana y profesional, dentro de esta materia las comunicaciones inalámbricas móviles juegan un papel muy importante para solventar este hecho.

A pesar de la diversidad de los sistemas e interfaces en las comunicaciones móviles, las tecnologías existentes no permiten por si mismas el mejor servicio disponible y es necesario buscar métodos para aprovechar las ventajas de dos o más tipos de tecnología en un sólo sistema, con el objetivo de incrementar la cobertura del servicio y así mejorar la calidad de las comunicaciones.

Con ello, la literatura presenta diversos y muy diferentes maneras de dar solución, además de mejorar el sistema handoff en la comunicación inalámbrica móvil en todas sus variantes tecnológicas. La aplicación de los métodos de reconocimiento de patrones, como son las redes neuronales, presenta muchas ventajas y soluciones para la mejora de la continuidad en este tipo de comunicación.

Siguiendo la línea de investigación antes mencionada en la solución y modelado de los algoritmos handoff, esta tesis presenta la utilización del Clasificador Gamma, basado en los modelos asociativos Alfa-Beta, los cuales poseen las cualidades de los modelos de reconocimiento de patrones, ofreciendo un cómputo rápido y simple de los datos en la mayoría de los casos que se les presenta. En este enfoque, la solución propuesta en este trabajo, adiciona ventajas al algoritmo de handoff en los sistemas ya existentes, con el fin de hacer más robusto el sistema handoff.

Basándose en estas ventajas y en los resultados que han ofrecido los modelos asociativos Alfa-Beta, en la literatura de un ámbito similar al de este tema de tesis; se aplicara y compara el desempeño del algoritmo con el método tradicional del handoff (únicamente medición del RSS), método utilizado en las mediciones presentes en el banco de datos a utilizar del repositorio de la comunidad CRAWDDAD [21].

1.3. Objetivo General

Aplicar el modelo asociativo del Clasificador Gamma en el proceso handoff de la arquitectura inalámbrica móvil GSM, para mejorar el tiempo de respuesta del algoritmo de handoff y maximizar la reutilización de la red tanto como sea posible.

1.4. Objetivos Específicos

- Utilizar el banco de datos Intel/Placelab, que contiene la recolección de datos GSM en un área ubicada en la ciudad de Seattle EUA, para realizar las pruebas del algoritmo Clasificador Gamma

- ⤵ Obtener la predicción de la trayectoria de usuarios móviles con respecto a los datos que se obtienen del Clasificador Gamma
- ⤵ Realizar el método 10-fold cross validation para el algoritmo implementado
- ⤵ Comparar los resultados con el algoritmo de handoff tradicional existente, en tiempo de respuesta y número de handoffs realizados

1.5. Estructura de la Tesis

En este capítulo se presentaron: los antecedentes, la justificación, el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo de tesis. Las partes subsecuentes de este documento se organizan de la siguiente manera:

El capítulo 2 se divide en dos secciones, la primera realiza una breve presentación sobre los conceptos básicos y las principales características del proceso de handoff, así como la descripción del estado del arte que unifica el tema del handoff junto el de reconocimiento de patrones; para pasar a la segunda parte que nos introduce tanto en los conceptos básicos de las memorias asociativas como los modelos de las memorias asociativas Alfa-Beta que preceden al desarrollo del Clasificador Gamma.

El capítulo 3 describe a detalle los conceptos y características del algoritmo del Clasificador Gamma, basado en los modelos asociativos Alfa-Beta, los cuales se aplican en esta tesis dentro del proceso de decisión handoff. Además se presentan los parámetros y conceptos más comunes del algoritmo handoff y que son importantes para poder aplicar el algoritmo propuesto al banco de datos elegido.

Posteriormente, en el capítulo 4 se describen las características y parámetros considerados para la aplicación del modelo de predicción handoff propuesto, basándose en las mediciones realizadas de una estación móvil. Posteriormente, se presenta el modelo de predicción de handoff propuesto basado en el algoritmo del Clasificador Gamma. Finalmente, se aborda una breve descripción de algunos métodos de validación para los algoritmos de reconocimiento de patrones, con el objetivo de mostrar el método utilizado para el modelo propuesto.

El capítulo 5 presenta los resultados obtenidos de la experimentación realizada con el algoritmo de predicción handoff desarrollado en esta tesis, se hace hincapié en que el banco de datos usado fue extraído del repositorio de la comunidad CRAWDDAD de la Universidad de Dartmouth de los Estados Unidos de America.

Finalmente en el capítulo 6 se describen las conclusiones generales del presente trabajo realizado junto con la propuesta de trabajos a futuro, los cuales se pueden desarrollar basándose en las aportaciones obtenidas por esta tesis.

Capítulo 2

Estado del Arte

Este capítulo se encuentra organizado en tres secciones: la primera consiste en las nociones básicas de la telefonía celular, especificaciones del algoritmo o procedimiento handoff, la segunda parte muestra los conceptos básicos de las memorias asociativas Alfa-Beta, así como una breve descripción histórica de los modelos clásicos que la preceden y finalmente se presenta el estado del arte relacionado con los algoritmos de handoff desarrollados en los últimos años.

2.1. Comunicaciones inalámbricas y handoff

2.1.1. Conceptos básicos de telefonía celular y handoff

La movilidad es una característica muy importante en sistemas de comunicación de acceso inalámbrico. Esta puede ser definida como el conjunto de funcionalidades necesarias que brindan una comunicación de datos ininterrumpida en condiciones de desplazamiento con dispositivos móviles. Las interrupciones en la comunicación sólo son aceptables cuando el desempeño de las aplicaciones no se ve afectado significativamente por el retraso en el envío-recepción de los datos.

Las tecnologías aplicadas a este tipo de comunicación varían ampliamente desde el ancho de banda [22], frecuencias [22], tasas de transferencia [22] y los métodos de acceso [22]. A pesar de la heterogeneidad de los sistemas e interfaces se pueden distinguir dos grandes categorías en las tecnologías [23]: aquellas que ofrecen un bajo ancho de banda sobre un área geográfica grande y aquellas que proveen un alto ancho de banda sobre un área geográfica muy pequeña. Por este último hecho, las tecnologías no permiten por sí mismas el mejor servicio disponible y es necesario buscar métodos para aprovechar las ventajas de alguno de los dos tipos de tecnología o ambos con el objetivo de incrementar la cobertura del servicio y así mejorar la calidad de las comunicaciones.

En las redes de datos móviles los puntos de conexión son referidos como estaciones base (BS: Base Station) y en las WLAN como puntos de acceso (AP: Access Point). El inconveniente que se presenta en este tipo de redes de comunicación es que una sola BS no puede cubrir y satisfacer las necesidades de todas las estaciones móviles (MS: Mobile Station) disponibles, además de que su alcance es limitado [4] tal y como se muestra en la figura 2.1.

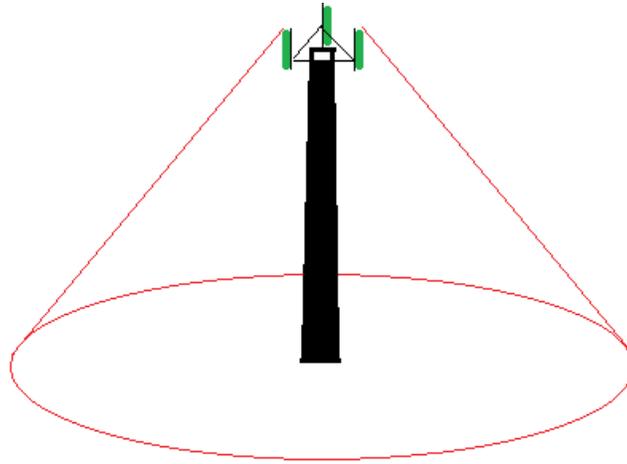


Figura 2.1: Cobertura de una estación base.

Por ello para ampliar la cobertura y poder proporcionar el servicio a una mayor cantidad de usuarios, se creó una estructura de red celular con un patrón de radiación considerado idealmente como hexagonal [4, 24]. Esta disposición de las estaciones base se encuentra contigua para poder cubrir la mayor área posible y sin que una interfiera con otra, como se puede visualizar en la figura 2.2.

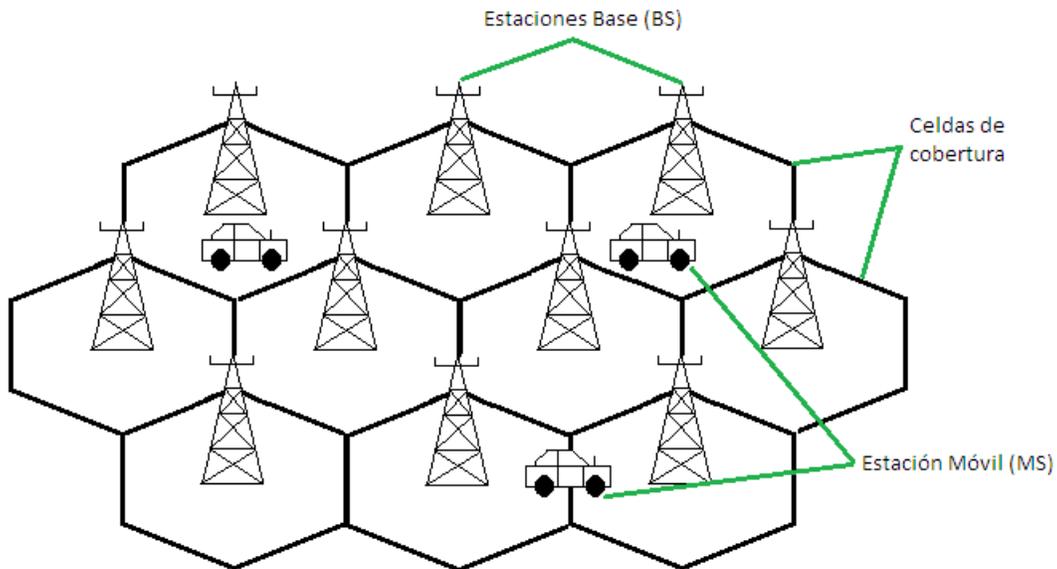


Figura 2.2: Configuración estructural de una red celular

De esta manera el sistema de red celular se vuelve más robusto pero existe otra cuestión a resolver para asegurar la continuidad en la comunicación entre las estaciones móviles. El sistema que permite

una comunicación inalámbrica y móvil, asegurando la conexión y la mejor calidad posible se le denomina handoff (HO) [23]. Este sistema es el que permite a los usuarios móviles de cualquier red inalámbrica móvil la conexión sin interrupciones y de preferencia transparente para el usuario. Un procedimiento de HO es iniciado principalmente al cruzar los límites de una celda, o a causa de deterioro en la calidad de la señal o QoS (Quality of Service) o porque otra BS puede ofrecer mejor Calidad en el Servicio; si el consumo de recursos de la BS está saturado es otro motivo para aplicar el procedimiento de HO.

Dentro de la literatura se pueden encontrar diferentes maneras de clasificar el algoritmo de handoff dependiendo de la característica que se quiera mejorar, en este capítulo solo presentaremos brevemente dos clasificaciones. La primera se denomina HO horizontal y la segunda HO vertical [23, 25], estos métodos se refieren de una manera más específica al tipo de infraestructura de la red. El primero es aquel que se realiza entre estaciones base que utilizan el mismo tipo de interface de red inalámbrica; el segundo se presenta entre estaciones base que utilizan diferentes interfaces de red inalámbrica, por ejemplo, el traspaso de una comunicación entre una red WiFi y una red celular con GSM (Global System for Mobile Communications) [4, 6].

La segunda clasificación se caracteriza por la manera en que se realiza el método de handoff, es decir como el software realiza las acciones necesarias para tratar de mantener la continuidad en la comunicación. Por ello, los handoff se dividen también en dos categorías soft handoff (SHO) y hard handoff (HHO) [25].

En las redes móviles de primera y segunda generación, se empleaba el traspaso duro (hard handoff); ahora en las redes de tercera generación, se introduce el concepto de traspaso con continuidad o suave (soft handoff). Comparado con el convencional traspaso duro, el traspaso suave tiene las ventajas de una transmisión más suave y menores efectos del tipo ping-pong, es decir, por sucesivos trasposos de llamadas, pero también dirigido a la continuidad de los servicios móviles, ofrece una ganancia en diferentes áreas del sistema; sin embargo, el traspaso suave tiene las desventajas de la complejidad y el consumo de recursos extra [24]. Por lo tanto, la optimización es crucial para garantizar el rendimiento del traspaso suave.

De esta manera, la aplicación del modo de funcionamiento del HO depende del tipo de red inalámbrica en que se aplique y enfocándonos en las redes de comunicación celular encontramos que existen diferentes métodos para resolver el problema de asegurar una comunicación eficiente en las estaciones móviles, así como asegurar una buena calidad del servicio sin pérdidas de conexión en la red causadas por un HO mal aplicado.

Para soportar la continuidad en la comunicación en condiciones de movilidad, un mecanismo de handoff se encarga de transferir la conexión de una BS a otra, esto se logra cambiando los parámetros de la interfaz inalámbrica de la conexión [6].

Existen cuatro diferentes tipos de traspaso en el sistema GSM, que implican la transferencia de una llamada:

1. Entre canales (espectros de frecuencias) en la misma celda.
2. Entre estaciones base (BS) bajo el mismo controlador de estación base (BSC).
3. Entre las células bajo el control de diferentes BSC, pero pertenecientes a la misma central de servicios móviles de conmutación (MSC).
4. Entre las células bajo el control de las diferentes MSC.

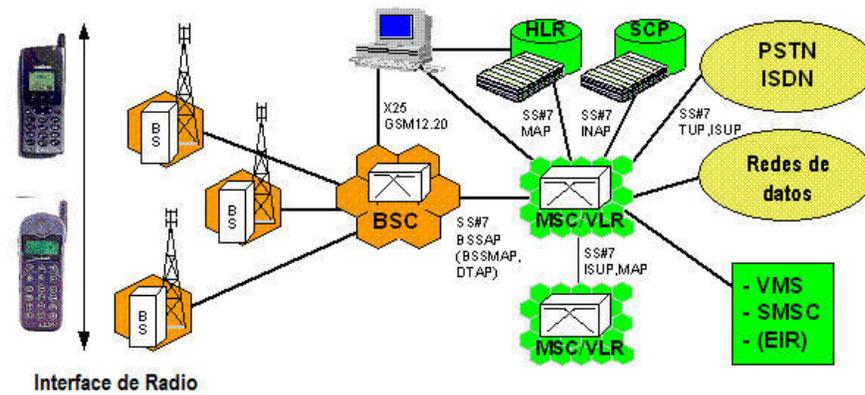


Figura 2.3: Componentes de la red GSM.

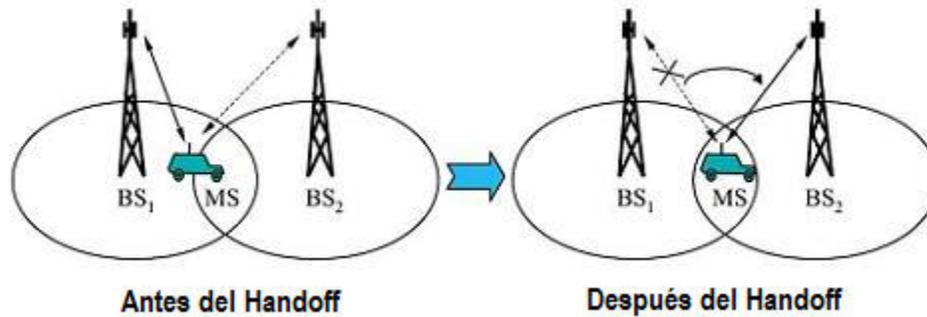


Figura 2.4: Handoff por cambio de estación base (BS)

Los dos primeros tipos de handoff, llamados handoff internos, involucran únicamente a un controlador de estación base (BSC), debido al ahorro en ancho de banda de señalización, que son gestionados por éste sin la participación del centro de servicios móviles de conmutación (MSC), con la excepción de ser solo notificado al llevarse a cabo la finalización de la ejecución del handoff. En cambio los dos últimos tipos de handoff, llamados handoff externos, son manejados por el MSC. Un aspecto importante de GSM es que el MSC original sigue siendo responsable de la mayoría de las funciones relacionadas con las llamadas: sin embargo no lo es así en el procedimiento de handoff efectuado bajo el control de la nueva MSC, es decir, cuando se cambia el MSC (ver figura 2.3) [22, 23].

El proceso de handoff puede ser iniciado tanto por la BS como por la MS. El proceso de handoff consiste de varias fases, iniciando con la selección de la BS seguida por la decisión de hacer el handoff hasta completar el proceso de inicialización y registro con la nueva BS. Como ejemplo de handoff podemos observar en la figura 2.4, en el que por desplazamiento del usuario, el handoff sucede por una disminución en la calidad de la señal.

A partir de la descripción general del funcionamiento de las comunicaciones dentro de la red GSM presentada en esta sección, podemos continuar con el tema específico que concierne a esta tesis respecto al procedimiento que sigue el algoritmo de handoff dentro del sistema GSM. Cabe destacar que este algoritmo es el que permite conservar la comunicación móvil dentro de la red cuando se presenta algún cambio en las condiciones de la comunicación, ya sea por cobertura o saturación de los canales de

comunicación.

2.1.2. El Algoritmo de handoff

Existen varios algoritmos de decisión en handoff y pueden ser utilizados cualquiera de ellos para hacer un correcto procedimiento con la conexión actual. Independientemente del algoritmo, es posible identificar tres fases secuenciales que están involucrados en todos ellos [26]:

Fase de medición: La medición del enlace de comunicación o su calidad, se miden tanto por la estación base, como por la estación móvil o ambos.

Fase de iniciación y la asignación de recursos: Esta fase incluye la decisión de si un handoff es necesario, independientemente de la disponibilidad de un canal o de la estación base que este en servicio, la cual realiza el procesado de las mediciones resultantes o de diferentes variables de red, incluida la que ofrece el tráfico. Una vez que la necesidad del handoff es determinada, el nuevo canal se selecciona de acuerdo con la disponibilidad de los recursos y disposición de la red.

Fase de ejecución: Una vez que el nuevo canal es seleccionado, el handoff se ejecuta.

Con base en las fases descritas anteriormente, los diferentes algoritmos de handoff pueden clasificarse de acuerdo con la entrada base o parámetro de entrada que el algoritmo usa para su procesamiento y su ejecución:

- ∨ Algoritmos basados en la potencia de señal recibida, son aquellos en los cuales la medición, iniciación y asignación es hecha con los parámetros de una o más señales recibidas de las estaciones base vecinas.
- ∨ Algoritmos basados en la calidad de la señal, son aquellos que usan la razón de error de bit (BER), la razón de error de los paquetes de datos (PER) o la razón de error en la trama (FER) como parámetros de entrada para este tipo de algoritmos.
- ∨ Algoritmos que se basan en las estimaciones de la relación a distancia y velocidad de las estaciones móviles. La conexión en un movimiento rápido en vehículos o estaciones móviles que se estén desplazando más rápido de lo normal, pueden ser conmutadas desde pequeñas células de cobertura hacia células más grandes a fin de evitar handoff frecuentes. En realidad esta clase de algoritmos es, desde una amplia perspectiva, la experiencia más desafiante, debido a que la ubicación de información es difícil de encontrar, no es exacta, la medición de parámetros y variables cambia rápidamente.
- ∨ Algoritmos basados en el historial: el algoritmo con base en su comportamiento, con respecto a los parámetros de movimientos medidos.

2.1.3. Handoff

En los últimos años la literatura exhibe diferentes métodos no convencionales para la ejecución de algoritmos de handoff y generalmente son comparados con los primeros métodos empleados en las aplicaciones comerciales de hoy en día.

Entre los diferentes métodos utilizados para ejecutar el HO en diferentes redes inalámbricas se encuentran primeramente los convencionales que utilizan directamente los datos medidos en la red de la fuerza de la señal recibida (RSS: Received Signal Strengt), también están los algoritmos que

adicionan un valor de histéresis o un umbral [6, 27] para determinar la decisión de ejecución del handoff.

Dentro de los métodos no convencionales como lo es el reconocimientos de patrones, se encuentran ampliamente utilizadas las redes neuronales en sus diferentes implementaciones; tal es el caso de las redes neuronales con backpropagation: Tsungnan menciona en su artículo [28] que la red neuronal aplicada aprende la relación entre el estimador de calidad del servicio y los indicadores métricos del contexto y basándose en un aprendizaje pre-procesado la red neuronal realiza la decisión del handoff en el vínculo de calidad y no del RSS.

En otra cita bibliográfica [29] se encuentra una red neuronal que decide el handoff basándose en los parámetros de la dirección del móvil con el método MUSIC, la RSS, la intensidad del tráfico y toma en cuenta el fenómeno de Shadow Fading; con ello presenta la mejora de la eficiencia del algoritmo de handoff comparado con el método tradicional de histéresis.

Dentro de la predicción de la localización del usuario móvil se encuentra el uso las redes neuronales [30]. Este modelo utiliza la red neuronal para localizar al usuario móvil de manera precisa, reduciendo el costo de manejo de la localización para la red y se basa en las variaciones de la misma red como la reasignación de canales y la fuerza de la señal.

El método de lógica difusa también se ve inmerso en las aplicaciones de algoritmos de handoff en [31] donde se menciona la aplicación de este método con el objetivo de mejorar las propiedades de pertenencia a una celda específica usando una predisposición de dirección adaptiva que reduce el procesamiento de carga en la red.

Además, participan también las redes neuronales Hopfield utilizándolas para la asignación dinámica de canales en una red celular [32], donde se considera la recepción de nuevas llamadas y el handoff ocasionado por la movilidad del tráfico. En este modelo se presentan dos esquemas de desarrollo dando prioridad al handoff en un sentido, mientras que en el otro se da prioridad a la probabilidad de bloqueo de llamada y del handoff.

Otro modelo con red neuronal Hopfield [33] aplica la red para encontrar los niveles óptimos de las conexiones respecto a la calidad del servicio (QoS), y se menciona que maximiza la utilización de recursos y la ganancia estadística junto con el multiplexado. Este método toma en cuenta la congestión de la red y se adapta para ofrecer un servicio aceptable maximizando los recursos.

Los métodos no convencionales para la ejecución del handoff ahora están siendo combinados de manera que solventes las desventajas que poseen en su forma individual. Entre estos métodos esta la unión de una red neuronal y lógica difusa para sistemas celulares jerárquicos. En él se diseña un administrador neuronal difuso de recursos (NFRM), el cual contiene un procesador neural difuso de asignación de canal. Este utiliza como entradas la probabilidad de fallo del handoff y el estudio de los recursos disponibles para realizar el control de admisión de llamadas (CAC) y la tasa de control y así logra una mejora de la calidad del servicio, la utilización del sistema y disminuye la cantidad de handoffs ejecutados comparados con los sistemas tradicionales de CAC. Para mayores detalles consultar [31].

Otro método encontrado en la literatura aplica la programación dinámica [27] en un algoritmo de handoff suave utilizando como entradas la calidad de la llamada, el número promedio de estaciones base activas, la actualización promedio del número de conjuntos activos y cantidad de interferencia, el shadow fading y los efectos de movilidad. Esto lo combina con los métodos estadísticos de Wilkinson, Schwartz y Yeh para el cálculo de la suma ponderada de las señales mejorando así la cantidad de handoff efectuados y descartando el uso del RSS.

Algunos otros métodos de reconocimiento de patrones aplicados al algoritmo de handoff son: las redes neuronales probabilísticas [34], las redes neuronales Elman [35] o la combinación de dos diferentes tipos de redes neuronales [35].

Una vez descrito a detalle el proceso de handoff dentro de la red celular GSM y su estado del arte, presentaremos a continuación las generalidades del área de Inteligencia Artificial, específicamente del enfoque asociativo de reconocimiento de patrones, así como su estado del arte; y con ello introducir el vínculo que relaciona éstos dos temas dentro del algoritmo propuesto en esta tesis, y que tiene por objetivo de mejorar la funcionalidad del handoff en GSM.

2.2. Conceptos Básicos de Memorias Asociativas

El propósito fundamental de una memoria asociativa es recuperar correctamente patrones completos a partir de patrones de entrada, los cuales pueden estar modificados debido a alteraciones de tipo aditivo, sustractivo o combinado; ésta es la característica más atractiva de las memorias asociativas. El tema de las memorias asociativas ha estado vigente recientemente dentro de algunas áreas de investigación, como son la predicción de contaminantes atmosféricos [36] o aprendizaje y recuperación de datos [37].

El problema inherente al funcionamiento de las memorias asociativas consta de dos fases claramente distinguibles:

1. Fase de aprendizaje (generación de la memoria asociativa)
2. Fase de recuperación (operación de la memoria asociativa)

Para estar en condiciones de realizar el planteamiento del problema, es preciso mencionar los conceptos básicos, las notaciones y la nomenclatura relacionados con el diseño y funcionamiento de las memorias asociativas. Una memoria asociativa M puede formularse como un sistema de entrada y salida, idea que se esquematiza en la Figura 2.5.

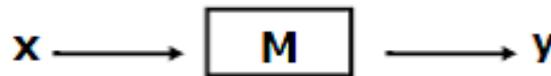


Figura 2.5: Esquema de una memoria asociativa.

El patrón de entrada está representado por un vector columna denotado por \mathbf{x} y el patrón de salida, por el vector columna denotado por \mathbf{y} . Cada uno de los patrones de entrada forma una asociación con el correspondiente patrón de salida. La notación para una asociación es similar a la de una pareja ordenada; por ejemplo, los patrones \mathbf{x} y \mathbf{y} del esquema forman la asociación (\mathbf{x}, \mathbf{y}) . Para facilitar la manipulación algebraica de los patrones de entrada y de salida, los denotaremos con las mismas letras negrillas, \mathbf{x} y \mathbf{y} , agregándoles números naturales como superíndices para efectos de discriminación simbólica. Por ejemplo, a un patrón de entrada \mathbf{x}^1 le corresponderá un patrón de salida \mathbf{y}^1 , y ambos formarán la asociación $(\mathbf{x}^1, \mathbf{y}^1)$; del mismo modo, para un número entero positivo k específico, la asociación correspondiente será $(\mathbf{x}^k, \mathbf{y}^k)$.

La memoria asociativa M se representa mediante una matriz que se genera a partir de un conjunto finito de asociaciones conocidas de antemano: éste es el conjunto fundamental de aprendizaje, o simplemente conjunto fundamental. El conjunto fundamental se representa de la siguiente manera, donde p es un número entero positivo que representa la cardinalidad del conjunto fundamental:

$$\{(\mathbf{x}^\mu, \mathbf{y}^\mu) \mid \mu = 1, 2, \dots, p\}$$

A los patrones que conforman las asociaciones del conjunto fundamental, se les llama patrones fundamentales. La naturaleza del conjunto fundamental proporciona un importante criterio para clasificar las memorias asociativas.

Si se cumple que $\mathbf{x}^\mu = \mathbf{y}^\mu \forall \mu \in \{1, 2, \dots, p\}$ se dice que la memoria es autoasociativa; por lo que se debe de cumplir que $n = m$. La memoria es heteroasociativa cuando se afirma que $\exists \mu \in \{1, 2, \dots, p\}$ para el que se cumple que $\mathbf{x}^\mu \neq \mathbf{y}^\mu$, nótese que puede haber memorias heteroasociativas con $n = m$.

En la caracterización de los patrones de entrada, de salida y de la matriz M , primeramente se requiere la especificación de dos conjuntos a los que llamaremos arbitrariamente A y B .

La importancia de estos dos conjuntos radica en que las componentes de los vectores columna que representan a los patrones, tanto de entrada como de salida, serán elementos del conjunto A , y las entradas de la matriz M serán elementos del conjunto B . No hay requisitos previos ni limitaciones respecto de la elección de estos dos conjuntos, por lo que no necesariamente deben ser diferentes o poseer características especiales. Esto significa que el número de posibilidades para escoger A y B es infinito. Por lo tanto, cada vector columna que representa a un patrón de entrada tiene n componentes cuyos valores pertenecen al conjunto A , y cada vector columna que representa a un patrón de salida posee m componentes cuyos valores pertenecen al conjunto A . Es decir:

$$\mathbf{x}^\mu \in A^n \text{ y } \mathbf{y}^\mu \in A^m \forall \mu \in \{1, 2, \dots, p\}$$

La j -ésima componente de un vector columna se indica con la misma letra del vector, pero sin negrilla, colocando a j como subíndice ($j \in \{1, 2, \dots, n\}$ o $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ según corresponda). La j -ésima componente de un vector columna \mathbf{x}^μ se representa por x_j^μ . Con lo anterior, ahora es posible presentar el planteamiento del problema general de las memorias asociativas:

Fase de aprendizaje: Encontrar los operadores adecuados y una manera de generar una matriz M que almacene las p asociaciones del conjunto fundamental $\{(x^1, y^1), (x^2, y^2), \dots, (x^p, y^p)\}$, donde $\mathbf{x}^\mu \in A^n$ y $\mathbf{y}^\mu \in A^m \forall \mu \in \{1, 2, \dots, p\}$. Si $\exists \mu \in \{1, 2, \dots, p\}$ tal que $\mathbf{x}^\mu \neq \mathbf{y}^\mu$ la memoria será heteroasociativa; si $m = n$ y $\mathbf{x}^\mu = \mathbf{y}^\mu \forall \mu \in \{1, 2, \dots, p\}$, la memoria será autoasociativa.

Fase de recuperación: Hallar los operadores adecuados y las condiciones suficientes para obtener el patrón fundamental de salida \mathbf{y}^μ , cuando se opera la memoria M con el patrón de entrada \mathbf{x}^μ ; lo anterior para todos los elementos del conjunto fundamental y para ambos modos: autoasociativo y heteroasociativo.

Una memoria asociativa M exhibe una recuperación correcta si al presentarle como entrada, en la fase de recuperación, un patrón \mathbf{x}^ω con $\omega \in \{1, 2, \dots, p\}$, ésta responde con el correspondiente patrón fundamental de salida \mathbf{y}^ω .

Ya se han presentado los conceptos generales de los dos temas a unificar en esta tesis, por un lado esta el proceso handoff dentro del área de las telecomunicaciones y por el otro lado, se encuentran las Memorias Asociativas pertenecientes al área de la Inteligencia Artificial. Con éstas bases mínimas, que el lector puede profundizar consultando la bibliografía sugerida, a continuación presentaremos algunos de los desarrollos científicos más recientes dentro de las dos áreas del conocimiento tratadas en este trabajo; que a su vez sirven como base de la solución propuesta por esta tesis.

2.2.1. Memorias Asociativas

Durante las últimas décadas notables investigadores han abordado el problema de generar modelos de memorias asociativas, entre los que destacan: Steinbuch, 1961; Kohonen, 1972; Kohonen & Ruohonen, 1973; Hopfield, 1982; Austin, 1987; Kanerva, 1988; Buhmann, 1995; Ritter, Sussner & Diaz-de-Leon, 1998; Ritter, Diaz-de-Leon & Sussner, 1999, y han logrado resultados de importancia tal, que algunos de los trabajos pioneros (décadas 1970 y 1980) se han convertido en auténticos clásicos.

2.2.2. Memorias asociativas Alfa-Beta

En esta sección se presenta el fundamento teórico que sustenta a las memorias asociativas Alfa-Beta tal como se presenta en [19]; para ello, se muestran las definiciones de las operaciones α y β , las operaciones matriciales utilizando estas operaciones originales, y se describen las fases de aprendizaje y recuperación de las memorias heteroasociativas y autoasociativas Alfa-Beta \vee_{\max} y \wedge_{\min} .

La numeración de las ecuaciones que se presentan en esta sección, corresponde a la numeración original que aparece en la tesis [19].

2.2.2.1. Operaciones binarias α y β : definiciones y propiedades

Las memorias Alfa-Beta utilizan máximos y mínimos, y dos operaciones binarias originales α y β de las cuales heredan el nombre

Para la definición de las operaciones binarias α y β se deben especificar los conjuntos A y B , los cuales son:

$$A = \{0, 1\} \text{ y } B = \{0, 1, 2\}$$

La operación binaria $\alpha: A \times A \rightarrow B$ se define como se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Operación binaria $\alpha(A \times A) \rightarrow B$

x	y	$\alpha(x, y)$
0	0	1
0	1	0
1	0	2
1	1	1

La operación binaria $\beta: (B \times A) \rightarrow A$ se define como se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Operación binaria $\beta(B \times A) \rightarrow A$

x	y	$\beta(x, y)$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1
2	0	1
2	1	1

Los conjuntos A y B , las operaciones binarias α y β junto con los operadores \bigwedge (mínimo) y \bigvee (máximo) usuales conforman el sistema algebraico $(A, B, \alpha, \beta, \bigwedge, \bigvee)$ en el que están inmersas las memorias asociativas Alfa-Beta [19, 38].

Se requiere la definición de cuatro operaciones matriciales, de las cuales se usarán sólo 4 casos particulares:

$$\text{Operación } \alpha_{max} : P_{m \times r} \nabla_{\alpha} Q_{r \times n} = [f_{ij}^{\alpha}]_{m \times n}, \text{ donde } f_{ij}^{\alpha} = \bigvee_{k=1}^r \alpha(p_{ik}, q_{kj})$$

$$\text{Operación } \beta_{max} : P_{m \times r} \nabla_{\beta} Q_{r \times n} = [f_{ij}^{\beta}]_{m \times n}, \text{ donde } f_{ij}^{\beta} = \bigvee_{k=1}^r \beta(p_{ik}, q_{kj})$$

$$\text{Operación } \alpha_{min} : P_{m \times r} \nabla_{\alpha} Q_{r \times n} = [f_{ij}^{\alpha}]_{m \times n}, \text{ donde } f_{ij}^{\alpha} = \bigwedge_{k=1}^r \alpha(p_{ik}, q_{kj})$$

$$\text{Operación } \beta_{min} : P_{m \times r} \nabla_{\beta} Q_{r \times n} = [f_{ij}^{\beta}]_{m \times n}, \text{ donde } f_{ij}^{\beta} = \bigwedge_{k=1}^r \beta(p_{ik}, q_{kj})$$

2.2.2.2. Memorias Heteroasociativas Alfa-Beta

Se tienen dos tipos de memorias heteroasociativas Alfa-Beta: tipo \bigvee (max) y tipo \bigwedge (min). En la generación de ambos tipos de memorias se usará el operador \otimes el cual tiene la siguiente forma:

$$y^{\mu} \otimes (x^{\mu}) |_{ij} = \alpha(y_i^{\mu}, x_i^{\mu}); \mu \in \{1, 2, \dots, p\}, i \in \{1, 2, \dots, m\}, j \in \{1, 2, \dots, n\}$$

Algoritmo Memorias Alfa – Beta tipo \vee

Fase de Aprendizaje

Paso1. Para cada $\mu = 1, 2, \dots, p$, a partir de la pareja (x^μ, y^μ) se construye la matriz

$$[y^\mu \otimes (x^\mu)^t]_{m \times n}$$

Paso2. Se aplica el operador binario máximo \vee a las matrices obtenidas en el paso 1:

$$\vee = \bigvee_{\mu=1}^p [y^\mu \otimes (x^\mu)^t]$$

La entrada ij -ésima está dada por la siguiente expresión:

$$v_{ij} = \bigvee_{\mu=1}^p \alpha(y_i^\mu, x_j^\mu)$$

Fase de Recuperación

Se presenta un patrón x^w , con $w \in \{1, 2, \dots, p\}$, a la memoria heteroasociativa $\alpha\beta$ tipo \vee y se realiza la operación ∇_β : $\vee \nabla_\beta x^w$.

Dado que las dimensiones de la matriz \vee son de $m \times n$ y x^w es un vector columna de dimensión n , el resultado de la operación anterior debe ser un vector columna de dimensión m , cuya i -ésima componente es:

$$(\vee \nabla_\beta x^w)_i = \bigwedge_{j=1}^n \beta(v_{ij}, x_j^w)$$

Ver demostración de la recuperación en [19].

Algoritmo Memorias Alfa – Beta tipo \wedge

Fase de Aprendizaje

Paso1. Para cada $\mu = 1, 2, \dots, p$, a partir de la pareja (x^μ, y^μ) se construye la matriz

$$[y^\mu \otimes (x^\mu)^t]_{m \times n}$$

Paso2. Se aplica el operador binario mínimo \wedge a las matrices obtenidas en el paso 1:

$$\wedge = \bigwedge_{\mu=1}^p [y^\mu \otimes (x^\mu)^t]$$

La entrada ij -ésima está dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = \bigwedge_{\mu=1}^p \alpha(y_i^\mu, x_j^\mu)$$

Fase de Recuperación

Se presenta un patrón x^ω , con $\omega \in \{1, 2, \dots, p\}$, a la memoria heteroasociativa $\alpha\beta$ tipo \bigwedge y se realiza la operación ∇_β : $\bigvee \nabla_\beta x^\omega$.

Dado que las dimensiones de la matriz \bigwedge son de $m \times n$ y x^ω es un vector columna de dimensión n , el resultado de la operación anterior debe ser un vector columna de dimensión m , cuya i -ésima componente es:

$$\left(\bigwedge \nabla_\beta x^\omega\right)_i = \bigvee_{j=1}^n \beta(\lambda, x_j^\mu)$$

Ver detalles de la demostración de recuperación en [19].

2.2.2.3. Memorias Autoasociativas Alfa-Beta

Si a una memoria heteroasociativa se le impone la condición de que $y^\mu = x^\mu \forall \mu \in \{1, 2, \dots, p\}$ entonces, deja de ser heteroasociativa y ahora se le denomina autoasociativa.

A continuación se enlistan algunas de las características de las memorias autoasociativas Alfa-Beta :

1. El conjunto fundamental toma la forma $\{(x^\mu, x^\mu) | \mu = 1, 2, \dots, p\}$
2. Los patrones fundamentales de entrada y salida son de la misma dimensión; denotémosla por n .
3. La memoria es una matriz cuadrada, para ambos tipos, \bigvee y \bigwedge . Si $x^\mu \in A^n$ entonces:

$$\bigvee = [v_{ij}]_{n \times n} \text{ y } \bigwedge = [\lambda_{ij}]_{n \times n}$$

Algoritmo Memorias Autoasociativas Alfa – Beta tipo \bigvee

Las fases de aprendizaje y recuperación son similares a las memorias heteroasociativas Alfa-Beta.

Fase de Aprendizaje

Paso1. Para cada $\mu = 1, 2, \dots, p$, a partir de la pareja (x^μ, x^μ) se construye la matriz

$$[x^\mu \otimes (x^\mu)^t]_{n \times n}$$

Paso2. Se aplica el operador binario máximo \bigvee a las matrices obtenidas en el paso 1:

$$\bigvee = \bigvee_{\mu=1}^p [x^\mu \otimes (x^\mu)^t]$$

La entrada ij -ésima está dada por la siguiente expresión:

$$v_{ij} = \bigvee_{\mu=1}^p \alpha(x_i^\mu, x_j^\mu)$$

y de acuerdo con que $\alpha: A \times A \rightarrow B$, se tiene que $v_{ij} \in B$, $i \in \{1, 2, \dots, n\} \cdot \forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Fase de Recuperación

La fase de recuperación de las memorias autoasociativas Alfa- Beta tipo \vee tiene dos casos posibles. En el primer caso el patrón de entrada es un patrón fundamental; es decir, la entrada es un patrón x^ω , con $\omega \in \{1, 2, \dots, p\}$. En el segundo caso, el patrón de entrada NO es un patrón fundamental, sino la versión distorsionada de por lo menos uno de los patrones fundamentales; lo anterior significa que si el patrón de entrada es \tilde{x} , debe existir al menos un valor de índice $\omega \in \{1, 2, \dots, p\}$, que corresponde al patrón fundamental respecto del cual \tilde{x} es una versión alterada con alguno de los tres tipos de ruido: aditivo, sustractivo o mezclado.

Caso 1 : Patrón fundamental. Se presenta un patrón x^ω , con $\omega \in \{1, 2, \dots, p\}$, a la memoria autoasociativa $\alpha\beta$ tipo \vee y se realiza la operación ∇_β :

$$\vee \nabla_\beta x^\omega.$$

El resultado de la operación anterior será el vector columna de dimensión n .

$$\begin{aligned} (\vee \nabla_\beta x^\omega) &= \bigwedge_{j=1}^n \beta(v_{ij}, x_j^\omega) \\ (\vee \nabla_\beta x^\omega) &= \bigwedge_{j=1}^n \beta \left\{ \left[\bigvee_{\mu=1}^p \alpha(x_i^\mu, x_j^\mu) \right], x_j^\omega \right\} \end{aligned}$$

Caso 2 : Patrón alterado. Se presenta el patrón binario \tilde{x} (patrón alterado de algún patrón fundamental x^ω) que es un vector columna de dimensión n , a la memoria autoasociativa Alfa-Beta tipo \vee y se realiza la operación

$$\vee \nabla_\beta \tilde{x}$$

Al igual que en el caso 1, el resultado de la operación anterior es un vector columna de dimensión n , cuya i -ésima componente se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} (\vee \nabla_\beta \tilde{x}) &= \bigwedge_{j=1}^n \beta(v_{ij}, \tilde{x}_j) \\ (\vee \nabla_\beta \tilde{x}) &= \bigwedge_{j=1}^n \beta \left\{ \left[\bigvee_{\mu=1}^p \alpha(x_i^\mu, x_j^\mu) \right], \tilde{x}_j \right\} \end{aligned}$$

De acuerdo con el Teorema 4.7, que puede consultarse en [19]:

$$\vee \nabla_\beta x^\omega = x^\omega, \forall \omega \in \{1, 2, \dots, p\}$$

Esto significa que la memoria autoasociativa Alfa-Beta tipo \vee recupera de manera correcta el conjunto fundamental completo. Además, en la demostración de este Teorema, en ningún momento aparece restricción alguna sobre p , que es la cardinalidad del conjunto fundamental; y esto quiere decir que el conjunto fundamental puede crecer tanto como se quiera. La consecuencia directa es que el número de patrones que puede aprender una memoria autoasociativa Alfa-Beta tipo \vee , con recuperación correcta, es máximo.

Algoritmo Memorias Autoasociativas Alfa – Beta tipo \bigwedge

Fase de Aprendizaje

Paso1. Para cada $\mu = 1, 2, \dots, p$, a partir de la pareja (x^μ, x^μ) se construye la matriz

$$[x^\mu \otimes (x^\mu)^t]_{n \times n}$$

Paso2. Se aplica el operador binario máximo \bigwedge a las matrices obtenidas en el paso 1:

$$\bigwedge = \bigwedge_{\mu=1}^p [x^\mu \otimes (x^\mu)^t]$$

La entrada ij -ésima está dada por la siguiente expresión:

$$\lambda_{ij} = \bigwedge_{\mu=1}^p \alpha(x_i^\mu, x_j^\mu)$$

y de acuerdo con que $\alpha: A \times A \rightarrow B$, se tiene que $\lambda_{ij} \in B$, $i \in \{1, 2, \dots, n\} \cdot \forall j \in \{1, 2, \dots, n\}$.

Fase de Recuperación

La fase de recuperación de las memorias autoasociativas Alfa- Beta tipo \bigwedge tiene dos casos posibles. En el primer caso el patrón de entrada es un patrón fundamental; es decir, la entrada es un patrón x^ω , con $\omega \in \{1, 2, \dots, p\}$. En el segundo caso, el patrón de entrada NO es un patrón fundamental, sino la versión distorsionada de por lo menos uno de los patrones fundamentales; lo anterior significa que si el patrón de entrada es \tilde{x} , debe existir al menos un valor de índice $\omega \in \{1, 2, \dots, p\}$, que corresponde al patrón fundamental respecto del cual \tilde{x} es una versión alterada con alguno de los tres tipos de ruido: aditivo, sustractivo o mezclado.

Caso 1 : Patrón fundamental. Se presenta un patrón x^ω , con $w \in \{1, 2, \dots, p\}$, a la memoria autoasociativa $\alpha\beta$ tipo \bigvee y se realiza la operación ∇_β :

$$\bigwedge \nabla_\beta x^\omega.$$

El resultado de la operación anterior será el vector columna de dimensión n .

$$\begin{aligned} (\bigwedge \nabla_\beta x^\omega) &= \bigvee_{j=1}^n \beta(\lambda_{ij}, x_j^\omega) \\ (\bigwedge \nabla_\beta x^\omega) &= \bigvee_{j=1}^n \beta \left\{ \left[\bigwedge_{\mu=1}^p \alpha(x_i^\mu, x_j^\mu) \right], x_j^\omega \right\} \end{aligned}$$

Caso 2 : Patrón alterado. Se presenta el patrón binario \tilde{x} (patrón alterado de algún patrón fundamental x^ω) que es un vector columna de dimensión n , a la memoria autoasociativa Alfa-Beta tipo \bigwedge y se realiza la operación

$$\bigwedge \nabla_\beta \tilde{x}$$

Al igual que en el caso 1, el resultado de la operación anterior es un vector columna de dimensión n , cuya i -ésima componente se expresa de la siguiente manera:

$$(\bigwedge \nabla_{\beta} \tilde{x}) = \bigvee_{j=1}^n \beta(\lambda_{ij}, \tilde{x})$$

$$(\bigwedge \nabla_{\beta} \tilde{x}) = \bigvee_{j=1}^n \beta \left\{ \left[\bigwedge_{\mu=1}^p \alpha(x_i^{\mu}, x_j^{\mu}) \right], \tilde{x}_j \right\}$$

De acuerdo con el Teorema 4.7, que puede consultarse en [19]:

$$\bigvee \nabla_{\beta} x^{\omega} = x^{\omega}, \forall \omega \in \{1, 2, \dots, p\}$$

Esto significa que la memoria autoasociativa Alfa-Beta tipo V recupera de manera correcta el conjunto fundamental completo. Además, en la demostración de este Teorema, en ningún momento aparece restricción alguna sobre p , que es la cardinalidad del conjunto fundamental; y esto quiere decir que el conjunto fundamental puede crecer tanto como se quiera. La consecuencia directa es que el número de patrones que puede aprender una memoria autoasociativa Alfa-Beta tipo \bigwedge , con recuperación correcta, es máximo.

Esta sección nos encamina dentro los temas a unificar en esta tesis: el proceso handoff y las Memorias Alfa-Beta. Estas bases nos permiten continuar con la descripción específica del modelo asociativo elegido para dar una propuesta de solución al algoritmo handoff. De esta manera, el siguiente capítulo exhibe de una manera más específica el modelo asociativo a emplear en el algoritmo propuesto, además de describir los parámetros de medición del proceso handoff a utilizar en el modelo del presente trabajo.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

En este capítulo se presentan, en dos secciones, los conceptos, materiales y métodos que se requieren para la descripción del algoritmo de handoff propuesto en esta tesis, que será desarrollado en el Capítulo 4. En la primera parte se describe el algoritmo del Clasificador Gamma como base fundamental del algoritmo de handoff propuesto, además de considerar los conceptos de los operadores Alfa y Beta descritos en el Capítulo 2.

Cabe destacar que las fórmulas y definiciones que describen el algoritmo del Clasificador Gamma fueron tomadas de la tesis [20], en la cual se creó este método de clasificación. Finalmente, se presentan los conceptos, funciones y procesos que se relacionan directamente con el método de handoff con respecto al estándar actual establecido para la tecnología de telefonía celular GSM.

3.1. Descripción del Clasificador Gamma

Gran parte del algoritmo propuesto en esta tesis para la predicción del handoff se basa en la correcta clasificación realizada por el Clasificador Gamma, por ello este método juega un papel muy importante dentro de los materiales utilizados para lograr una correcta y rápida realización del handoff si es necesario. A continuación se enuncia las características principales y el método de este Clasificador.

3.1.1. Operador Gamma de Similitud

Para poder enunciar el algoritmo de clasificación utilizado en esta tesis, es necesario presentar primero el operador Gamma de Similitud que resulta de gran importancia para la formulación de su algoritmo. Este operador deriva su nombre de sus características, primeramente, basado en los operadores α y β de las memorias asociativas Alfa-Beta, por ello se le asignó el nombre de Gamma, ya que es la siguiente letra a continuación de las primeras dos ya utilizadas como operadores, los cuales son α y β .

El objetivo principal de este operador es indicar el grado de similitud θ entre dos vectores, es decir, el operador indica si dos vectores son parecidos o no. De esta manera el argumento θ establece la tolerancia al comparar dos vectores y como resultado nos indica el grado de similitud de los vectores no obstante que son diferentes. A continuación se define el operador Gamma de similitud:

$$\gamma(x, y, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } n - u_\beta [\alpha(x, y) \bmod 2] \leq \theta \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

A continuación se presenta un ejemplo de la aplicación de este operador:

Ejemplo 3.1 Sean $x = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$, $y = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ y $\theta = 3$, calcular $\gamma(x, y, \theta)$.

Se tiene que $n = 5$. Entonces $\alpha(x, y) = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \bmod 2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$,

$u_\beta \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = 3$, $5 - 3 = 2$, y como $2 < 3$, entonces $2 \leq 3$, y el resultado es $\gamma(x, y, \theta) = 1$.

Si se desea consultar más ejemplos de aplicación de este operador, se puede consultar [20] en su Capítulo 4.

3.1.2. Algoritmo del Clasificador Gamma

Este algoritmo hace uso de los operadores alfa y beta y de sus propiedades, así como del operador gamma de similitud (que a su vez requiere el uso del operador u_β y del concepto de módulo) y sus propiedades. A continuación se presenta el algoritmo del Clasificador Gamma con la numeración del documento original [39].

Definición 4.13 Sean: el conjunto $A = \{0, 1\}$, dos números $n, m \in \mathbb{Z}^+$, $n \leq m$, $x \in A^n$ y $y \in A^m$ dos vectores binarios, n-dimensional y m-dimensional, respectivamente, con la i-ésima componente representada por x_i y y_i , respectivamente; y θ un número entero no negativo. Se define el operador Gamma de similitud generalizado $\gamma_g(x, y, \theta)$ de la siguiente manera: $\gamma_g(x, y, \theta)$ tiene como argumentos de entrada dos vectores binarios x y y , y un número entero no negativo θ , y la salida es un número binario que se calcula así:

$$\gamma_g(x, y, \theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } m - u_\beta [\alpha(x, y) \bmod 2] \leq \theta \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Entonces el algoritmo de clasificación Gamma generalizada queda como sigue (Figura 3.1).

Algoritmo 4.14 Sean los números $k, m, n, p \in \mathbb{Z}^+$, $\{x^\mu \mid \mu = 1, 2, \dots, p\}$ el conjunto fundamental de patrones de cardinalidad p , donde $\forall \mu x^\mu \in \mathbb{R}^n$ es un vector rel n-dimensional a ser clasificado. Se asume que el conjunto fundamental esta particionado en clases diferentes, donde cada clase tiene cardinalidad k_i , $i = 1, 2, \dots, m$, por lo que $\sum_{i=1}^m k_i = p$. Para clasificar el patrón y , se realiza lo siguiente:

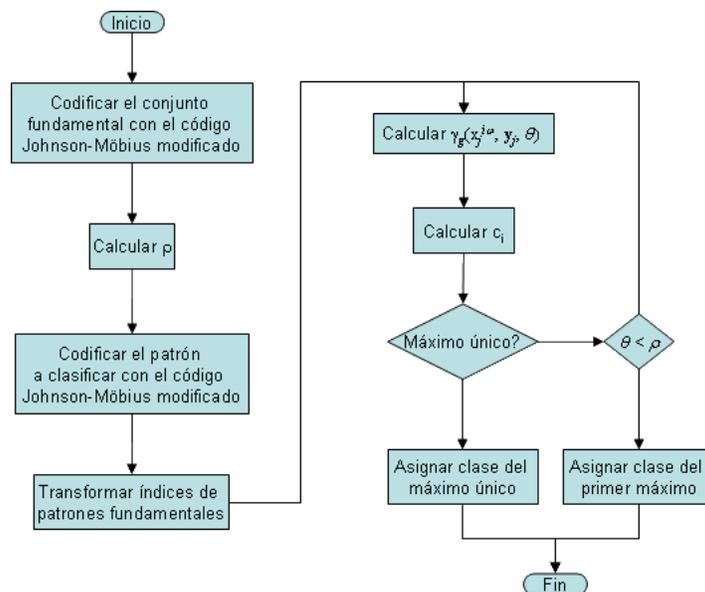


Figura 3.1: Diagrama de bloques del algoritmo del Clasificador Gamma generalizado

1. Codificar cada componente de cada patrón del conjunto fundamental con el código Johnson-Möbius modificado, obteniéndose un valor $e_m = \prod_{i=1}^p x_j^i$ por cada componente. Así, la componente x_j^i se transforma en un vector binario de dimensión $e_m(j)$.

2. Calcular el parámetro de paro $\rho = \bigwedge_{j=1}^n e_m(j)$.

3. Codificar cada componente del patrón a clasificar con el código Johnson-Möbius modificado, utilizando las mismas condiciones que se utilizaron para codificar las componentes de los patrones fundamentales. En caso de que alguna componente del patrón a clasificar sea mayor al e_m correspondiente ($y_\xi > e_m(\xi)$), igualar esa componente a $e_m(\xi)$ y guardar su valor anterior en la variable max_ξ .

4. Realizar una transformación de índices en los patrones del conjunto fundamental, de manera que el índice único que tenía un patrón originalmente en el conjunto fundamental, por ejemplo x^μ , se convierta en dos índices: uno para la clase (por ejemplo clase i) y otro para el orden que le corresponde a ese patrón dentro de la clase (por ejemplo ω). Bajo estas condiciones ejemplificadas, la notación para el patrón x^μ será ahora, con la transformación, $x^{i\omega}$. Lo anterior se realiza para todos los patrones del conjunto fundamental.

5. Inicializar θ a 0.

6. Realizar la operación $\gamma(x_j^{i\omega}, y_j, \theta)$ para cada clase y para cada componente de cada uno de los patrones fundamentales que corresponden a esa clase, y del patrón a clasificar, considerándose max_ξ como la dimensión del patrón binario y_ξ .

7. Calcular la suma ponderada c_i de los resultados obtenidos en el paso 6, para cada clase $i =$

1, 2, \dots, m :

$$c_i = \frac{\sum_{\omega=1}^{k_i} \sum_{j=1}^n \gamma_g(x_j^{i\omega}, y_j, \theta)}{k_i}$$

8. Si existe más de un máximo entre las sumas ponderadas por clase, incrementar θ en 1 y repetir los pasos 6 y 7 hasta que exista un máximo único, o se cumpla con la condición de paro $\theta \geq \rho$.
9. Si existe un máximo único, asignar al patrón a clasificar la clase correspondiente a ese máximo:

$$C_y = C_j \text{ tal que } \bigvee_{i=1}^m c_i = c_j$$

10. En caso contrario: si les el índice más pequeño de la clase que corresponde a uno de los máximos, asignar al patrón a clasificar la clase C_λ .

La presentación del algoritmo del Clasificador Gamma en esta sección nos ayudará a entender que parámetros de medición del proceso handoff se utilizarán dentro del Clasificador para dar solución al problema presentado en esta tesis. Por ello, a continuación se describen los principales parámetros de medición del algoritmo handoff.

3.2. Parámetros de medición del algoritmo handoff

Durante la conexión de una estación móvil a la red se establece una comunicación entre éstas últimas y las estaciones base para poder funcionar de manera correcta. Esta comunicación posee cierta información que es interpretada por ambas y es codificada dentro de un módulo de datos denominado reporte de mediciones de la estación móvil. Dentro de estos datos se encuentran por ejemplo el tipo de transmisión de datos, la potencia de la señal recibida o la estación base a la que se encuentra conectada la unidad móvil durante una conversación y también la información de las condiciones de las celdas vecinas que son candidatas a ser utilizadas por el dispositivo móvil, en caso de requerir la acción del handoff.

Este reporte de mediciones se encuentra clasificado dentro de los canales de control de la comunicación GSM, sobre el bloque denominado canal de control de acceso lento o SACCH (Slow Access Control Channel Figura 3.2) que tiene una longitud de 184 bits y es enviado a la red cada 480 ms o por lo menos una vez por segundo. El retardo de tiempo entre una medición individual y la recepción de datos medidos en la estación base es aproximadamente de entre 0.5 y 1 segundo. A continuación se presentan las definiciones de las diferentes mediciones efectuadas en este canal de control [40].

- ⤵ **DTX** : indica si la estación móvil está usando una transmisión discontinua.
- ⤵ **RXLEV de la Celda actual** : potencia que suministra la estación base actual, que son valores de 0 a 63 y codificados en 6 bits.
- ⤵ **RXQUAL FULL o RXQUAL SUB** : nivel de calidad de la señal en la estación base que actualmente esta conectado. Los ocho valores son codificados en 3 bits.
- ⤵ **(NoNCELL) Número de celdas** : indica el número de las estaciones vecinas medidas o monitoreadas por la estación móvil.
- ⤵ **RXLEV NCELL n** : nivel de señal de las estaciones vecinas.

0	0	0	0	0	1	1	TF	1
0	0	0	1	0	1	0	1	2
0	1	1	1	0	0	0	1	1
0	DTX	RXLEV Serving Cell						2
0	0	RXQUAL FULL	RXQUAL SUB					3
0	# NCELL	RXLEV						4
NCELL 1	0	BCCH FREQ NCELL 1						5
BSIC NCELL 1				RXLEV				6
NCELL 2		0	BCCH FREQ					7
NCELL 2		BSIC NCELL 2						8
RXLEV NCELL 3				0	BCCH			9
FREQ NCELL 3			BSIC					10
NCELL 3		RXLEV NCELL 4						11
0	BCCH FREQ NCELL 4			BSIC				12
NCELL 4		RXLEV						13
NCELL 5		0	BCCH FREQ NCELL 5					14
BSIC NCELL 5				RXLEV				15
NCELL 6		0	BCCH FREQ					16
NCELL 6		BSIC NCELL 6						17

Figura 3.2: Reporte de Mediciones de una estación móvil.

- ⋃ **BCCH FREQ N CELL n** : frecuencia de la transmisión BCCH de las estaciones vecinas codificada como un índice de la lista de canales del BCCH.
- ⋃ **BSIC NCELL n** : BSIC (código de identidad de la estación base, por sus siglas en inglés) de las estaciones vecinas y origen. Compuesto por 6 bits: 3 bits de código de color o identificación de la red y 3 bits del identificador o número de la estación base, véase figura 3.5.

Algunos ejemplos donde se pueden observar los niveles de enlace de bajada (downlink), de calidad de la señal (RXQUAL) y en potencia de la señal recibida (RXLEV) se encuentran en la figura 3.3.

En estas figuras se puede ver claramente como el nivel de recepción de señal afecta considerablemente los niveles de calidad de la conexión, es decir, al ser alto el nivel de la señal entonces la calidad de la conexión es buena, mientras que si los niveles de recepción de señal son bajos, entonces la calidad de la conexión es pobre [40].

Otro de los efectos que se pueden considerar en cuanto al algoritmo del handoff es el efecto del shadow fading. Este fenómeno se caracteriza por provocar cambios drásticos en los niveles de recepción de la señal y se presenta cuando en el entorno de comunicacion existen obstáculos de tamaño considerable, por ejemplo, en las ciudades se presenta mucho este efecto debido al gran tamaño de las edificaciones (Figura 3.4).

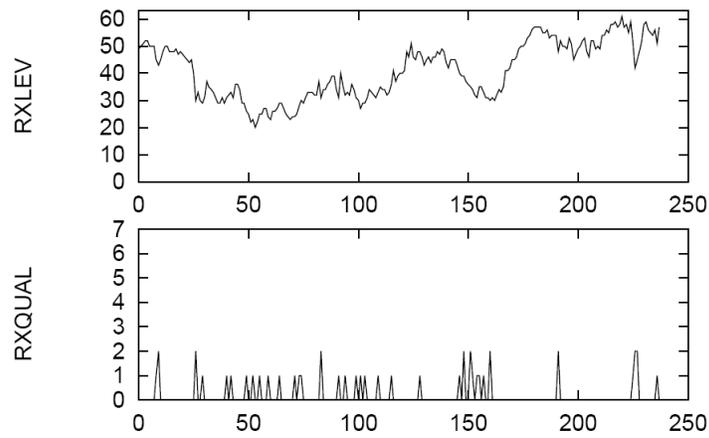


Figura 3.3: Valores de recepción de señal (RXLEV) y de calidad de señal (RXQUAL).

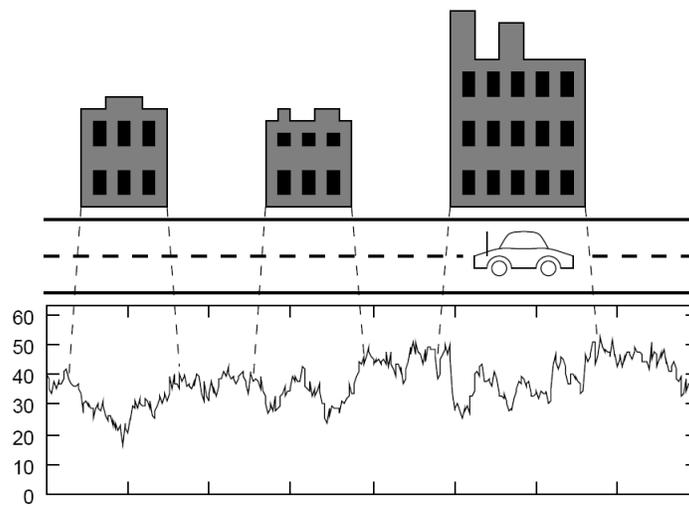


Figura 3.4: Niveles de señal afectado por la topografía.

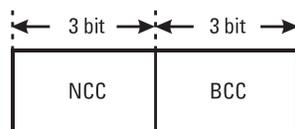


Figura 3.5: Formato del código BSIC

Tabla 3.1: Parámetros relativos

Condiciones en X_1	a	b
$X_1 \geq s + 14$	2	2
$s + 14 \leq X_1 < s + 1$	3	2
$s + 1 > X_1$	4	2

3.2.1. Nivel de Señal

El nivel de la señal recibida debe de ser empleado como un criterio en los procesos de control de potencia y de traspaso.

El valor cuadrático medio (RMS) de la señal recibida en la entrada del receptor debe de ser medida por la estación móvil y por la estación base en todo el intervalo de -110 dBm a -48 dBm de la trayectoria del móvil. Si el nivel de la señal recibida cae por debajo del nivel de referencia de sensibilidad para el tipo de estación móvil o estación base, entonces la reportarán dentro de un intervalo validado por la precisión absoluta, la cual es explicada en la siguiente sección. En caso de que el límite superior de este intervalo esté por debajo del nivel de sensibilidad de referencia definido por el tipo de estación móvil o estación base, entonces el límite superior debe ser considerado como igual al nivel de sensibilidad de referencia [40, 41].

3.2.1.1. Precisión absoluta

El nivel RMS del nivel de la señal recibida bajo condiciones estáticas y sin desvanecimientos, debe ser medida y reportada con una precisión absoluta de ± 4 dB desde -110 dBm hasta -70 dBm bajo condiciones normales y ± 6 dB para todo el intervalo bajo condiciones normales y extremas [41].

3.2.1.2. Precisión relativa

Si es recibida una señal deseada de niveles X_1 y X_2 dBm donde:

$$X_1 \leq X_2,$$

$$X_1 - X_2 < 20\text{dB},$$

$$X_1 \geq \text{Nivel de Sensibilidad de Referencia.}$$

Entonces los niveles y_1 y y_2 reportados deben satisfacer los siguientes requerimientos:

$$(X_2 - X_1) - a \leq Y_2 - Y_1 \leq (X_2 - X_1 + b); \text{ donde}$$

a y b están en dB y dependen del valor de X_1 de la tabla 3.1, donde “ s ” es el nivel de sensibilidad de referencia [41] (ver Tabla 3.1).

El nivel actual de sensibilidad está definido como el nivel de entrada para el cual se cumple el funcionamiento adecuado entre la estación base y la estación móvil [41]. El nivel de sensibilidad debe

Tabla 3.2: Niveles de Sensibilidad de Referencia

Tipo de estación	Sensibilidad de Referencia (dBm)
Estación móvil	-102 dBm
Estación base Estándar	-104 dBm
Estación base Micro M1	-102 dBm
Estación base Micro M2	-97 dBm
Estación base Micro M3	-92 dBm

Tabla 3.3: Equivalencia de valores entre RXLEV y dBm

Valor RXLEV	Nivel RMS de la señal RF (dBm)
0	≤ -110
1	-110 a -109
2	-109 a -108
3	-108 a -107
.	.
.	.
.	.
62	-49 a -48
63	> -48

ser menor que un límite especificado, llamado nivel de sensibilidad de referencia, definido en la Tabla 3.2.

Desde -110 dBm hasta -48dBm la potencia de la señal es medida con una relativa precisión de 1 dB y con una absoluta precisión de 4 dB (cuando es arriba de -70dBm) o 6 dB si es requerido.

Los niveles de la señal medida deben ser codificados y trasladados a un valor RXLEV entre 0 y 63 pasos [40, 41], de acuerdo con la Tabla 3.3.

3.2.2. Calidad de la Señal

La calidad de la señal recibida debe ser empleada como un criterio en los procesos de control de potencia y de traspaso [40, 41].

3.2.2.1. Parámetros físicos

La calidad de la señal recibida debe medirse por la estación móvil y la estación base en una forma tal que pueda ser relacionada a un valor equivalente promedio de BER (razón de error de bit por sus siglas en inglés) antes de aplicar la codificación de canal (i.e. tasa de error de símbolo), evaluado sobre el periodo reportado de un bloque SACCH [41].

Tabla 3.4: Traslación de valores de RXQUAL

Valor RXQUAL	Intervalo de BER	Valor asumido
0	$\text{BER} < 0.2\%$	0.14%
1	$0.2\% \leq \text{BER} < 0.4\%$	0.28%
2	$0.4\% \leq \text{BER} < 0.8\%$	0.57%
3	$0.8\% \leq \text{BER} < 1.6\%$	1.13%
4	$1.6\% \leq \text{BER} < 3.2\%$	2.26%
5	$3.2\% \leq \text{BER} < 6.4\%$	4.53%
6	$6.4\% \leq \text{BER} < 12.8\%$	9.05%
7	$12.8\% \leq \text{BER}$	18.10%

3.2.2.2. Intervalo de parámetros RXQUAL

La calidad del canal es evaluada sobre el conjunto completo y subconjunto de tramas SACCH obteniendo un valor promedio.

Son definidos ocho niveles de RXQUAL y deben ser trasladados a su valor equivalente BER antes de ser codificados de acuerdo con la Tabla 3.4 [40, 41], la precisión necesaria en las mediciones y la asignación de probabilidad para el nivel correcto debe ser del 75 % para (RXQUAL 1) y 95 % para otros niveles (RXQUAL 5-7). Entre mayor sea el valor del BER, menor es la calidad de la señal.

3.2.3. Descripción del protocolo de comunicación

El proceso de handoff en GSM es realizado con la siguiente secuencia [40]:

1. Valor de mediciones: Medición y transmisión de los datos como fueron descritos anteriormente.
2. Petición de handoff: La solicitud del proceso del handoff, si es requerida, es generada con la información básica con los valores de las mediciones.
3. Decisión de handoff: Una decisión es tomada para atender la petición.
4. Handoff: La apropiada señalización y cambio de canal por las dos partes, el de la estación móvil y la red celular, es finalmente ejecutada.

En un proceso normal de handoff la petición es generada por el BSC, la secuencia de decisión y la de handoff son responsabilidad del MSC. Dependiendo del tipo de handoff llevado a cabo, la secuencias 3 y 4 pueden ser implementadas en el BSC. Existen diversos criterios para la ejecución del handoff, los cuales no se abordan en esta tesis, sin embargo se pueden consultar en la bibliografía presentada [22, 3, 40].

Este capítulo presenta de manera específica las partes a unificar de las dos disciplinas tratadas en esta tesis. El primer tema es el del Clasificador Gamma, del cual se describió a detalle y las condiciones en que la información debe ser introducida en él, así como la manera en que lo trabaja; el segundo tema es el de los parámetros de medición más relevantes dentro del proceso handoff y como se obtienen esas mediciones. De esta manera, el siguiente capítulo describe el modelo propuesto para dar solución al problema de esta tesis y en el que se explican las condiciones consideradas para la unión de éstos dos temas dentro de un algoritmo computacional.

Capítulo 4

Modelo Propuesto

En el presente capítulo se describen las características y parámetros considerados para el desarrollo de la propuesta de la predicción del handoff, la cual debe realizarse con el suficiente tiempo para conservar la comunicación dentro de los parámetros establecidos en los protocolos actuales de la telefonía GSM. Se describen . Posteriormente, se presenta el algoritmo handoff propuesto para la predicción de la trayectoria de un usuario móvil. Finalmente, se describe brevemente los métodos para validar la eficiencia del algoritmo propuesto.

4.1. Descripción de los patrones de entrada y predicción

Existen diversos algoritmos y métodos utilizados [6, 27, 28, 29, 31, 32], para la ejecución del handoff en las comunicaciones móviles y en particular, en las comunicaciones de telefonía celular, pero cabe destacar que todos ellos deben respetar los estándares internacionales para asegurar las condiciones adecuadas en los servicios que éstas comunicaciones ofrecen. Los estándares citados [41], mencionan las condiciones a respetar en el proceso handoff pero la manera en que se realiza no está limitada, debido a que éstas condiciones las determina el operador de la red. Esto se debe a que los factores y contextos en los que se encuentra inmiscuido el sistema son muy diversos y dependen desde una legislación local de telecomunicaciones, hasta las condiciones que convengan y se adapten mejor a las compañías que proveen los servicios de telefonía móvil.

De esta manera se puede deducir que los parámetros a considerar dentro del proceso handoff son muy variables pero existen parámetros que son fundamentales para la aplicación del handoff, como por ejemplo, la potencia de la señal (RSS), el nivel de calidad (QoS), histéresis de la señal y umbrales de señal. La elección de qué parámetros utilizar dentro del método de handoff queda a elección del operador que lo va a aplicar pero siempre se deben considerar las recomendaciones establecidas por el estándar internacional.

Además la literatura exhibe otros métodos que se aplican para ayudar a determinar la decisión de ejecución de un handoff como lo es el de posicionamiento, el cual involucra otras variables para su funcionamiento y que de la misma manera que los parámetros mencionados anteriormente, quedan al criterio de los operadores.

El método propuesto en esta tesis utiliza algunos de los parámetros utilizados en el área de posicionamiento para la ejecución del proceso handoff y forman parte de la información utilizada para su aplicación. Este dato es el CGI (Cell Global Identification) [22], el cual está compuesto por: MCC

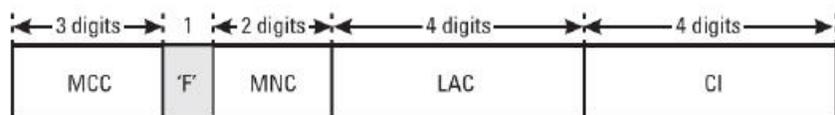


Figura 4.1: Formato del código CGI.

(Mobile Country Code), MNC (Mobile Network Code), LAC (Location Area Code) y por el CI (Cell Identity), ver figura 4.1. El código que lo conforma está compuesto por dígitos enteros (para propósitos de simplificación sólo se utilizará el CI para una aplicación local pero se puede extender para una mayor cobertura de red), además se agrega la información de la estación base actualmente en servicio (BSIC) y la fuerza de la señal de recepción (RSS).

Se destaca que los datos antes mencionados están presentes en el modelo propuesto para la celda a la cual el dispositivo móvil se encuentra conectado y los datos correspondientes a las celdas vecinas, las cuales pueden ser viables para la ejecución de un handoff.

El poseer los datos actuales del móvil junto con el de sus celdas vecinas nos proporciona la parte de posicionamiento antes mencionado y lo cual nos permite realizar un análisis más detallado para la selección de la mejor celda disponible al momento de necesitar la realización de un cambio de conexión durante alguna llamada que presente un dispositivo móvil. Generalmente el sistema GSM proporciona el reporte de 6 o 7 celdas vecinas, además de la celda de conexión actual.

De esta manera, el conocimiento de la información del CGI (Figura 4.1) y los demás datos mencionados para varias celdas entorno al móvil nos permite saber de manera anticipada cual celda es la más viable para un proceso handoff. Cabe destacar que con este mecanismo se realiza el proceso con mejor precisión y con suficiente anticipación al ofrecido por otros métodos handoff.

El modelo propuesto en el presente trabajo de tesis, utilizará, para la propuesta de solución, en su entrada un vector unidimensional con los parámetros de medición relevantes.

El vector unidimensional de entrada del algoritmo propuesto, para la ejecución de un handoff, está compuesto con los siguientes atributos: el código de identidad de la celda en servicio (CI), el código de identidad de la estación base actualmente en servicio (BSIC), el nivel de potencia de la señal (RSS) y finalmente un valor de clase asignado de acuerdo con el conjunto fundamental (historial) de la estación móvil en cuestión. Más adelante se detalla la conformación de este conjunto y el proceso que se realiza para obtener las clases.

Estos datos formarán parte del conjunto fundamental de nuestro algoritmo y son datos reales de algún móvil, recopilados a lo largo de su trayectoria, que pueden ser datos de un día, una semana o un mes, según se requiera. A estos datos los denominaremos Historial de la estación móvil, los cuales conforman el conjunto fundamental para la aplicación del análisis con el Clasificador Gamma y que se describirá a continuación.

Versio n	Sensor	Fecha	Hora	Nivel de Batería	Estatus de la batería	Celdas Visibles	Celda Actual (MCC:MNC:LAC:CI:RSS)	Canal	BSIC	Celda Actual (MCC:MNC:LAC:CI:RSS)
2.01	0	2007-01-22	00:00:16	100	1	6	310:41:43390:15841: 65	143	38	310:41:43390:15883: 47	

Figura 4.2: Formato original del banco de datos aplicado al algoritmo propuesto.

4.1.1. Descripción del conjunto fundamental

Debido a la limitada existencia de bancos de datos de telefonía GSM abiertos y factibles de uso para este trabajo, el algoritmo propuesto toma en cuenta los datos más relevantes dentro de los métodos existentes en la telefonía móvil, con vista a ser modificado por el usuario final y se adapte a sus necesidades. La parte relevante de esta propuesta es realizar la predicción del handoff cuando sea necesario, cumpliendo los requisitos en tiempo y los requerimientos de la red del proveedor, para con ello realizar una decisión final correcta de los handoff.

Anteriormente se describió uno de los vectores del conjunto fundamental, el cual contiene los datos de la celda actual (CI, BSIC, RSS y clase) y desde uno hasta 7 celdas vecinas (CI, BSIC, RSS). Este conjunto fundamental se conforma por uno o varios días de la trayectoria del móvil, su cardinalidad dependerá de las necesidades que se requiera satisfacer, ya sean en cuanto eficiencia de predicción o de tiempo de respuesta del algoritmo o de capacidad de almacenamiento de datos del sistema que lo aplique. En este trabajo se optó por realizar un equilibrio entre estas tres condiciones y los resultados obtenidos de las pruebas se presentan en el siguiente capítulo.

Con esta indicación se procedió a realizar un pre-procesamiento de la información del banco de datos utilizado para las pruebas del algoritmo propuesto. El formato de los datos originales del banco de datos se puede ver en la Figura 4.2.

La figura 4.2 muestra el banco de datos con los siguientes campos: versión del software con el que se tomaron las lecturas, si se encuentra activo o no el sensor, la fecha en que se tomó la lectura junto con la hora, el nivel de batería del dispositivo, el número de celdas visibles y los datos de la celda actual y las vecinas, las cuales poseen los datos de: MCC, MNC, LAC, CI, RSS, el canal utilizado y el código BSIC. De esta información sólo se tomaron 3 datos para la celda actual y los 3 correspondientes para cada una de las celdas vecinas. El nuevo formato del banco de datos para aplicarlo en el modelo propuesto, queda como se muestra en la figura 4.3.

La elección de 3 datos se realizó por dos razones importantes: la primera es que son datos que se pueden encontrar en cualquier sistema GSM donde se quiera aplicar el algoritmo y segundo, representan los datos mínimos para poder realizar la distinción entre celdas en una red GSM local. En caso de aplicar el algoritmo en una red de mayor tamaño (nacional o internacional), se recomienda incluir todos los datos del CGI.

Al momento de realizar la depuración de los datos, aquellas celdas vecinas que no contengan datos, se les asigna un cero. Esto último, se realiza con el objetivo de que al usar el banco de datos dentro del algoritmo del Clasificador Gamma, los datos vacíos no generen vectores de menor tamaño para los diferentes patrones.

Después de la depuración del banco de datos se procede a la asignación de clase a cada patrón tomando en cuenta los datos de la celda actual únicamente, es decir, los datos de la figura 4.3 con nombre: CII, BSIC1 y el RSS1 (columnas en color azul).

CI1	BSIC1	RSS1	CI2	BSIC2	RSS2	CI3	BSIC3	RSS3	CI4	BSIC4	RSS4	CI5	BSIC5	RSS5	CI6	BSIC6	RSS6	CI7	BSIC7	RSS7
5187	14	48	7364	31	24	5201	13	28	5229	14	38	5236	39	22	5194	18	40	0	0	0
5187	14	46	7364	31	20	4151	10	21	5229	14	29	5201	13	24	5194	18	42	5236	25	30
5187	14	46	7364	31	21	12054	14	21	5229	14	31	5201	13	22	5194	18	41	5236	25	32
5187	14	50	23146	30	25	7364	31	23	5229	14	45	5201	13	25	5194	18	36	5236	25	31
5229	14	55	23146	30	27	7364	31	20	5187	14	39	4151	10	19	5194	18	23	5236	25	34
5194	18	55	12061	25	26	5201	13	37	5229	14	24	5243	21	33	5187	39	31	5236	25	30

Figura 4.3: Formato final del conjunto fundamental de la estación móvil antes de agregar la clase.

Para la asignación de clases se toma en cuenta que el número del código de identidad de la celda en servicio (CI) y el código de identidad de la estación base actualmente en servicio (BSIC), hacen distinguibles las estaciones base (BS) a las que se conecta un móvil durante su trayectoria. De esta manera, la asignación de clase (ver figura 4.4) se realiza como sigue:

1. Se extraen los valores únicos del BSIC para los patrones de la celda actual junto con su respectivo valor de Identificador de celda (CI), de todos los patrones del conjunto fundamental de la estación móvil en cuestión.
2. Se organizan los patrones únicos, extraídos de los datos de la celda actual, de menor a mayor de acuerdo a su valor de BSIC y se conserva el valor respectivo de CI de cada patrón único, ya que se puede repetir el código BSIC pero no los valores del BSIC y CI en conjunto, por ejemplo, podemos tener dos estaciones base con un BSIC del mismo valor pero forzosamente tendrán un CI distinto y eso distingue una estación base de otra.
3. Con los datos organizados de manera ascendente, procedemos a asignar una clase a cada una de las celdas únicas extraídas desde el número 0 y hasta el número necesario para cubrir toda la lista con una clase única por estación base.
4. Posteriormente se le asigna la clase correspondiente a cada uno de los patrones de la celda actual del conjunto fundamental de la estación móvil según la clase asignada a las celdas únicas extraídas en el punto 2. De esta manera se agrega un nuevo rasgo a cada patrón del conjunto fundamental de la estación móvil, que es el valor de clase. El Formato final del conjunto fundamental de la estación móvil queda como se observa en la Figura 4.5.

Una vez finalizado el pre-procesamiento de los datos originales para la obtención del conjunto fundamental de la estación móvil a analizar, estamos listos para utilizarlo dentro del modelo propuesto.

Siguiendo con el algoritmo del Clasificador Gamma, hasta este punto ya se cuenta con un conjunto fundamental de análisis como entrada para el clasificador y ahora necesitamos introducir los vectores

4.1.2. Descripción del conjunto de prueba

El banco de datos que se utiliza como conjunto de prueba, para el algoritmo propuesto corresponde a la trayectoria registrada de algún móvil durante un día completo, el cual presenta el mismo formato que el conjunto fundamental con excepción de no tener el rasgo de clase. Ese rasgo es el que se busca asignar por medio del Clasificador Gamma. Se realiza un pre-procesamiento de los datos para usarlos con el algoritmo propuesto (ver Figura 4.4).

Los rasgos pertenecientes al conjunto de prueba son muy similares a los del conjunto fundamental y cuentan con los siguientes datos: el identificador de celda (CI), el código de identidad de la estación base actualmente en servicio (BSIC) y el nivel de potencia de la señal (RSS), éstos tres rasgos son

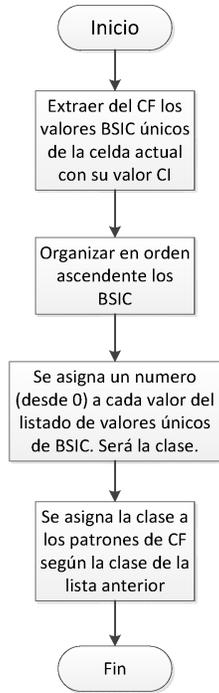


Figura 4.4: Diagrama de flujo para asignación de clases del conjunto fundamental

CI1	BSIC1	RSS1	Clase	CI2	BSIC2	RSS2	CI3	BSIC3	RSS3	CI4	BSIC4	RSS4	CI5	BSIC5	RSS5	CI6	BSIC6	RSS6	CI7	BSIC7	RSS7
15841	38	60	2	15883	19	38	5194	18	31	15834	54	23	15827	58	34	6097	4	27	17157	37	23
15841	38	60	2	15883	19	39	5194	18	33	15834	4	28	15827	58	33	6097	4	27	17157	37	24
15841	38	60	2	15883	19	39	5194	18	31	15834	4	27	15827	58	34	17157	45	20	0	0	0
15841	38	60	2	15883	19	39	5194	18	34	6097	4	27	15827	58	36	17157	54	18	0	0	0
15841	38	62	2	15883	19	39	5194	18	32	6097	4	28	15827	58	35	17157	54	17	0	0	0

Figura 4.5: Formato final del conjunto Fundamental de la estación móvil con clases asignadas.

CI1	BSIC1	RSS1	CI2	BSIC2	RSS2	CI3	BSIC3	RSS3	CI4	BSIC4	RSS4	CI5	BSIC5	RSS5	CI6	BSIC6	RSS6	CI7	BSIC7	RSS7
15841	38	48	15883	26	28	15827	58	46	15869	37	19	15876	15	23	5194	18	19	0	0	0
15827	58	48	15883	26	27	15841	38	44	15869	37	21	15876	15	22	5194	18	23	0	0	0
15827	58	49	15883	26	28	15841	38	47	15869	18	19	15876	15	23	12054	37	18	0	0	0
15827	58	49	15883	26	27	15841	38	47	15869	18	16	15876	15	23	12054	37	21	0	0	0
15841	38	58	15883	26	26	15827	58	34	5194	18	19	15876	15	22	12054	37	20	0	0	0

Figura 4.6: Formato de los patrones del conjunto de prueba.

iguales para las celdas vecinas disponibles en cada patrón de prueba y van desde 1 celda vecina, hasta seis celdas vecinas. El formato final del conjunto de prueba se puede visualizar en la Figura 4.5.

Una vez realizado el pre-procesamiento de la información, los datos necesarios para ejecutar el algoritmo de handoff están completos pero antes de ejecutarlo se tienen que cumplir también las condiciones necesarias para utilizar el Clasificador Gamma. Para ello es necesario transformar los datos a binario por medio de las reglas explicadas en el algoritmo 4.14 del capítulo 3 de esta tesis, posteriormente utilizar el Clasificador para obtener los datos necesarios para la predicción de la posición del móvil y encontrar la posible celda en la que se necesita la decisión del handoff.

Hasta este punto ya se cuenta con el conjunto fundamental con el que se realiza la fase de aprendizaje del Clasificador Gamma, se describieron los parámetros a considerar en el conjunto de prueba del Clasificador. Con la explicación de éstos dos conjuntos, se describirá específica el algoritmo propuesto para la clasificación de la información y posterior predicción del handoff de un móvil elegido.

4.2. Algoritmo de predicción de handoff propuesto

Las condiciones necesarias para comenzar con la ejecución del algoritmo del handoff son las siguientes:

1. Datos del conjunto fundamental de la estación móvil debidamente pre-procesados como se explicó en la sección 4.1.1 antes de la aplicación del Clasificador Gamma.
2. Datos pre-procesados según los requerimientos del algoritmo del Clasificador Gamma para el conjunto fundamental.
3. Conocimiento del número de clases y patrones dentro del conjunto fundamental.

Una vez establecidas las condiciones del algoritmo de handoff propuesto, su algoritmo es el siguiente (ver Figura 4.7):

1. Obtención de: los patrones del conjunto fundamental de la estación móvil, con las características descritas en la sección 4.1.1, el vector de prueba a analizar para la predicción con los valores del CI, BSIC y RSS (celda de conexión actual y vecinas) tal y como se describieron en la sección 4.1.2.
2. Lectura del valor RSS para referencia de preparación para un posible handoff, se guarda este valor para su uso posterior. Se toma como valor de umbral el de 32, que es equivalente a aproximadamente -102dB de Potencia de Recepción de la señal (RSS), el cual es un valor aceptable para una buena calidad en la comunicación GSM.

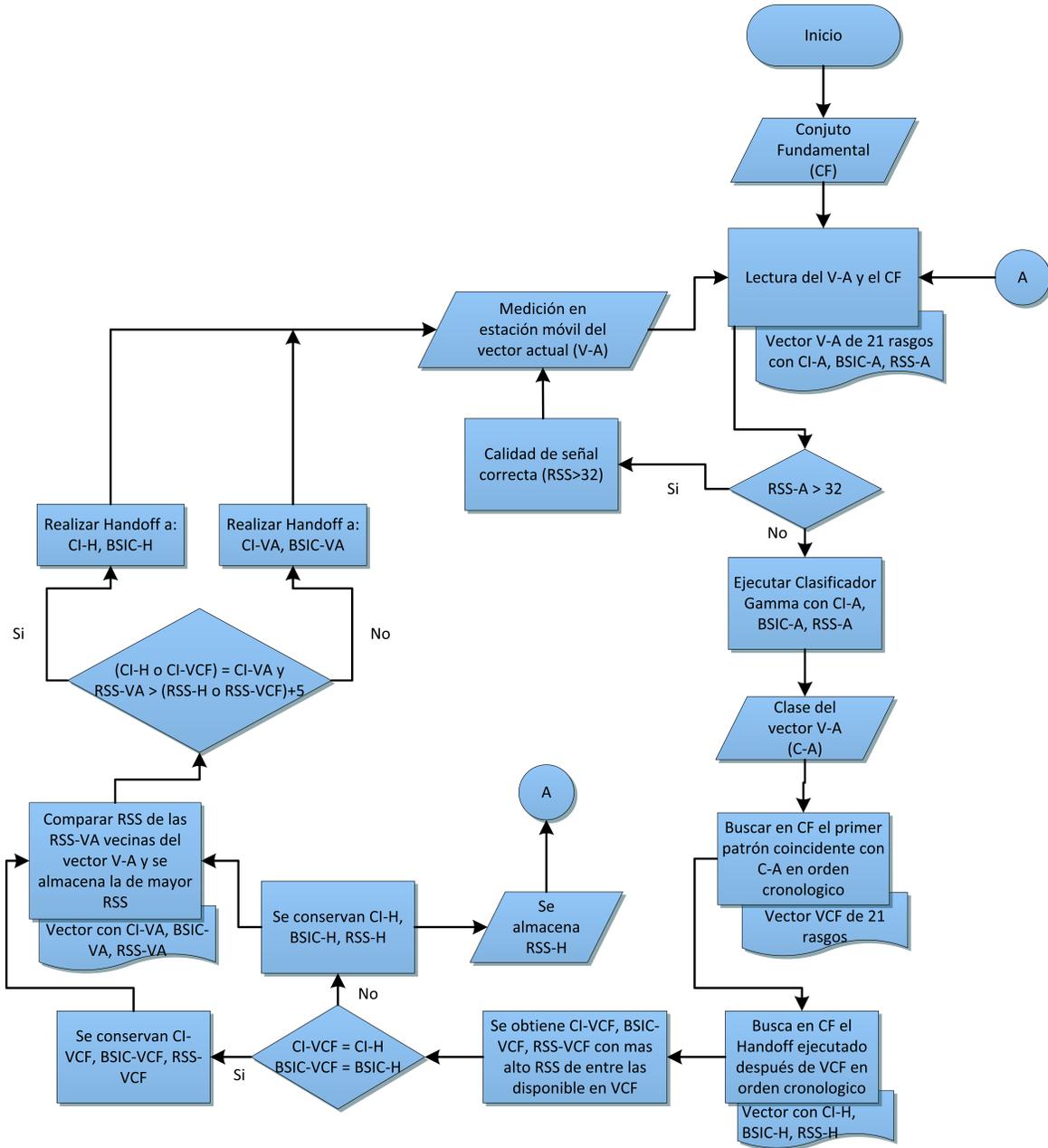


Figura 4.7: Diagrama general del algoritmo propuesto.

CI1	BSIC1	RSS1	Clase	CI2	BSIC2	RSS2	CI3	BSIC3	RSS3	CI4	BSIC4	RSS4	CI5	BSIC5	RSS5	CI6	BSIC6	RSS6	CI7	BSIC7	RSS7
15841	38	44	9	15827	58	25	15883	19	22	5124	18	33	11557	45	20	6097	4	21	0	0	0
15841	38	49	9	15827	58	31	15883	19	28	5124	18	27	11557	14	25	6097	4	21	0	0	0
15841	38	63	9	15827	58	45	15883	19	40	15834	26	36	5194	18	25	7084	15	29	6097	4	21
15827	58	50	12	15841	38	33	34167	18	20	15834	26	24	15869	37	35	4144	33	21	6097	13	25
15827	58	57	12	15841	38	43	34167	19	24	15834	26	26	15869	37	42	12054	14	22	6097	33	21
15841	38	61	9	15827	58	42	5194	18	31	15834	26	43	15869	37	33	15883	19	33	11564	51	32
15841	38	60	9	15827	58	38	5194	18	32	15834	26	36	15869	37	29	15883	19	49	15876	15	29
15841	38	76	9	15827	58	50	15834	26	41	15869	37	30	15883	19	53	11564	51	35	0	0	0
15841	38	61	9	15827	58	40	15834	26	38	15869	37	30	5194	18	35	15883	19	54	11564	51	30
15841	38	62	9	15827	58	35	23146	26	28	11564	37	31	5194	18	33	15883	19	51	0	0	0
15841	38	55	9	15827	58	24	23146	51	25	11564	37	20	5194	18	36	15883	19	42	0	0	0
15841	38	53	9	15827	58	21	5236	39	15	11557	45	19	5194	18	34	15883	19	42	11564	26	24
15841	38	52	9	15827	33	14	23146	30	9	15827	58	21	5194	18	32	15883	19	43	5236	39	12
15841	38	52	9	15827	33	14	23146	37	11	15827	58	20	5194	18	33	15883	19	43	5236	39	14
15841	38	52	9	15827	33	15	23146	37	12	15827	58	18	5194	18	33	15883	19	43	5236	39	15

Figura 4.8: Identificador de celda (CI) del conjunto fundamental.

CI1	BSIC1	RSS1	CI2	BSIC2	RSS2	CI3	BSIC3	RSS3	CI4	BSIC4	RSS4	CI5	BSIC5	RSS5	CI6	BSIC6	RSS6	CI7	BSIC7	RSS7
15827	58	24	23541	14	8	4144	33	10	15841	38	17	5194	18	6	15869	37	8	15834	26	3

Figura 4.9: Lectura datos de la celda actual.

- Como la Potencia de Recepción de la señal es buena no es necesario realizar una predicción de handoff y se continua el monitoreo de las mediciones de las señales del sistema regresando al punto número 2.

A continuación se describe el manejo del algoritmo con un ejemplo:

- ∩ Se obtienen los datos del conjunto fundamental de la estación móvil de un día o más de la trayectoria de algún móvil y se realiza el pre-procesamiento de los datos de acuerdo al algoritmo del Clasificador Gamma (ver Figura 4.8).
- ∩ Se realiza la lectura de las mediciones actuales de la estación móvil y se lee el dato del RSS actual (ver Figura 4.9).
- ∩ Al leer el dato de 24 para el RSS de la celda actual y se procede a ejecutar el algoritmo del Clasificador Gamma para obtener la clase a la que corresponde el CI de la lectura actual según el conjunto fundamental de la estación móvil.
- ∩ Posteriormente se busca la primera celda dentro del conjunto fundamental en la que se realizó un handoff con el mismo número de CI (al valor de lectura actual) y se identifica el número de CI de la celda siguiente en la que se realizó el handoff y se guardan (en alguna variable) los vaores de CI, BSIC y RSS de ésta celda. Estos valores de celda en la que se realizó un handoff efectivo dentro del conjunto fundamental nos sirven para valorar una posible celda a elegir para la ejecución del handoff actual si es que se requiere (ver Figura 4.10).

Este paso puede ser iterativo para varios valores de CI dentro del conjunto fundamental, el número de veces que se ejecute esta iteración queda a la elección de las necesidades de tiempo de ejecución límite para el usuario final.

- ∩ Posteriormente se comparan los datos sacados del conjunto fundamental con los datos de las celdas vecinas de la lectura actual del móvil, con el objetivo de decidir cuál es la celda más apropiada para realizar el handoff en caso de que se requiera.

CI1	BSIC1	RSS1	Clase	CI2	BSIC2	RSS2	CI3	BSIC3	RSS3	CI4	BSIC4	RSS4	CI5	BSIC5	RSS5	CI6	BSIC6	RSS6	CI7	BSIC7	RSS7		
15841	38	44	9	15827	58	25	15883	19	22	5124	18	33	11557	45	20	6097	4	21	0	0	0		
15841	38	49	9	15827	58	31	15883	19	28	5124	18	27	11557	14	25	6097	4	21	0	0	0		
15841	38	62	9	15827	CI de la celda actual dentro del Historial											18	25	7084	15	29	6097	4	21
15827	58	50	12	15841	38	33	34167	18	20	15834	26	24	15869	37	35	4144	33	21	6097	13	25		
15827	58	57	12	15841	38	43	34167	19	24	15834	26	26	15869	37	42	12054	14	22	6097	33	21		
15841	38	61	9	15827	58	42	5194	18	31	15834	26	43	15869	37	33	15883	19	33	11564	51	32		
15841	38	60	9	15827	58	38	5194	18	32	15834	26	36	15869	37	29	15883	19	49	15876	15	29		
15841	38	76	9	15827	58	50	1ª Celda donde se realizó el Handoff siguiente											51	35	0	0	0	
15841	38	61	9	15827	58	40	1ª a la celda actual dentro del Historial											19	54	11564	51	30	
15841	38	62	9	15827	58	35	23146	26	28	11564	37	31	5194	18	33	15883	19	51	0	0	0		
15841	38	55	9	15827	58	24	23146	51	25	11564	37	20	5194	18	36	15883	19	42	0	0	0		
15841	38	53	9	15827	58	21	5236	39	15	11557	45	19	5194	18	34	15883	19	42	11564	26	24		

Figura 4.10: CI celda actual y HO siguiente

15827	58	24	23541	14	8	4144	33	10	15841	38	17	5194	18	6	15869	37	8	15834	26	3
-------	----	----	-------	----	---	------	----	----	-------	----	----	------	----	---	-------	----	---	-------	----	---

Figura 4.11: CI probable para realizar el HO

- Si coincide que el CI de la celda con RSS de mayor valor dentro de los datos actuales, con el valor de CI donde se realizó el handoff dentro del conjunto fundamental para el CI de la lectura actual, entonces esa celda es segura para realizar la ejecución del handoff (en este ejemplo si coincide el valor de CI, ver Figura 4.11).
 - De otro modo, si el valor del CI de celda no coincide, se toma la celda sugerida por las celdas vecinas de las lecturas actuales del móvil.
- Gracias a la sugerencia realizada por el algoritmo del Clasificador Gamma y los datos de localización del móvil de acuerdo al conjunto fundamental, al final de éstos pasos, se conoce cuál es la celda más apropiada para realizar el handoff. En este ejemplo, la celda de CI-15841, es la elegida para el handoff, ya que posee el valor de RSS más alto dentro de las celdas vecinas actuales.

4.3. Métodos de validación

Existen diferentes métodos de validación como son el método H (Holdout), validación cruzada (K- fold cross validation), LOO (Leave One Out), entre otros. A continuación se presenta una breve descripción de los tres métodos de validación mencionados.

Holdout : El método holdout (método H) divide aleatoriamente el conjunto de datos en dos subconjuntos. El primer grupo se integra por 2/3 del total del conjunto de patrones y corresponde al denominado conjunto de entrenamiento, el cual es utilizado para que el clasificador aprenda, y el segundo grupo contiene el restante de los patrones es decir 1/3 y forma parte del grupo de prueba y con estos últimos se determina la asertividad del clasificador.

K – fold – cross – validation : En el método de k-dobles validación-cruzada (k-fold cross validation) [42], funciona de la siguiente manera: la base de datos es particionada aleatoriamente en k

subconjuntos, aproximadamente del mismo tamaño, en donde $k-1$ subconjuntos constituyen el conjunto de entrenamiento y el restante el conjunto de prueba.

Leave – One – Out :Es un caso especial del método de K-fold cross validation. En este método de validación la base de datos es particionada k veces, siendo k el número de casos originales n . Se forma un conjunto de entrenamiento con los $n-1$ casos dejando un caso fuera, el cual será utilizado en la clasificación. Cabe señalar que este método es el menos sesgado pero presenta una varianza alta, la cual en algunos casos presenta una estimación de la precisión del clasificador no deseada. Este tipo de validación, generalmente es aplicado a bases de datos con relativamente pocos casos.

Para el presente trabajo de tesis, se a utilizado el método de validación k-fold cross con $k = 10$.

De esta manera finalizamos la descripción del modelo propuesto y el método de validación a utilizar, para así continuar al análisis de los resultados obtenidos en la etapa experimental.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo muestra los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta en el capítulo 4. En la primera sección indicaremos las condiciones en las que se realizaron las pruebas y los parámetros considerados para realizarlas. Posteriormente se muestran los resultados obtenidos en la predicción de diferentes trayectorias de las lecturas obtenidas de un móvil real tomados del banco de datos “Tower Logger network availability”. Se concluye el capítulo con el análisis del desempeño computacional del algoritmo propuesto en el capítulo 4 de esta tesis.

5.1. Condiciones y parámetros de prueba

La realización de la predicción del handoff para la telefonía móvil GSM considera los criterios que se describirán a continuación:

1. Los datos analizados se tomaron del banco de datos “Tower Logger network availability” de CRAWDAD, ubicado dentro de los bancos de datos en el Recurso Comunitario para Archivar datos Inalámbricos en Dartmouth (CRAWDAD: Community Resource for Archiving Wireless Data at Dartmouth) [21]. El banco de datos posee las siguientes características: el software de identificación mide la disponibilidad de la red y los niveles de señal junto con la información en contexto. Este graba el ID de la torre celular, la fuerza de la señal (RSS) y el canal de la celda GSM actualmente asociada y aquellas de hasta un máximo de 6 celdas visibles cada 30 o 60 segundos.
2. Cabe destacar que los valores del RSS no se encuentran en una escala normalizada o aceptada por los estándares internacionales debido al software de medición utilizado. Presenta los datos en una escala de 0 a 100 para determinar la fuerza de la señal o RSS y por ello, no se debe considerar en el contexto utilizado de manera práctica en los sistemas reales. El valor de los umbrales tomados dentro del algoritmo propuesto se tomaron en cuenta de acuerdo con de la norma internacional para la telefonía celular GSM pero no se modificaron.
3. Los datos tomados para la experimentación y las pruebas son los correspondientes al usuario número 1 de los 10 disponibles dentro de la información del banco de datos Intel/Placelab. Los datos del usuario móvil elegido, se grabaron a partir del 16 de enero del 2007 y hasta el 26 de febrero de 2007, por un periodo de entre 16 y 18 horas diarias y con un intervalo entre cada registro de aproximadamente 1 minuto entre ellos.

Tabla 5.1: Cardinalidad de los conjuntos fundamentales utilizados en las pruebas.

Día de Predicción	Num. Días tomados para generar el conjunto fundamental	Patrones conjunto fundamental
18	1	1161
18	2	1859
19	2	2125
19	3	3286
20	2	1859
20	4	4713
22	5	6142
22	6	7568
23	3	4281
23	6	7833

4. Los conjuntos de prueba (usados para realizar la predicción) corresponden a un día completo de patrones y su predicción se realizó a partir de diferentes conjuntos fundamentales de diferente cardinalidad. Los conjuntos fundamentales utilizados en las pruebas están conformados por datos de cardinalidad que corresponden desde 1 día y hasta 5 días anteriores a la fecha que se quiere predecir (ver Tabla 5.1).
5. Medición del desempeño de la predicción.

Se describen a continuación las pruebas realizadas.

5.2. Pruebas de predicción con el algoritmo handoff propuesto

Los datos utilizados en los conjuntos fundamentales corresponden al usuario 1 del banco de datos, mencionado en la sección anterior, de los 10 disponibles.

Las características del banco de datos utilizado son:

- Cada día de registro del banco de datos contiene aproximadamente 1000 instancias en promedio, las cuales están conformadas por 9 atributos: fecha, tiempo, nivel de la batería, estado de carga de la batería, número de celdas visibles (iniciando con la celda actualmente conectada), información de la celda (CGI), potencia de la señal, canal de frecuencia utilizado y el código de identificación de la estación base (BSIC). De éstos datos sólo se toman 2, el CGI y la potencia de la señal; ya que representan la información suficiente para la predicción.
- El CGI posee la siguiente información: MCC, MNC, LAC y CID, anteriormente visto en el capítulo 3, seguido por la potencia de la señal de las celdas actuales y vecinas registradas en cierto tiempo.
- La trayectoria de la estación móvil se puede visualizar en el atributo CGI de la celda que da el servicio actual y también la ejecución del handoff a través de las diferentes celdas.

Fecha	Hora	Nivel de Bateria	Estatus de la batería	Celdas Visibles	Celda Actual (MCC:MNC:LAC:CI:RSS)	Canal	BSIC
2007-01-16	04:29:13	68	1	6	310:41:43390:5187: 48	141	14
2007-01-16	04:30:14	68	1	7	310:41:43390:5187: 46	141	14
2007-01-16	04:31:14	68	1	7	310:41:43390:5187: 46	141	14
2007-01-16	04:32:15	68	1	7	310:41:43390:5187: 50	141	14
2007-01-16	04:33:15	68	1	7	310:41:43390:5229: 55	718	14
2007-01-16	04:34:16	68	1	7	310:41:43390:5194: 55	135	18
2007-01-16	04:35:16	68	1	6	310:41:43390:5194: 45	135	18
2007-01-16	04:36:17	68	1	6	310:41:43390:5194: 47	135	18
2007-01-16	04:37:17	68	1	7	310:41:43390:11557: 45	161	45
2007-01-16	04:38:18	68	1	7	310:41:43390:11557: 55	161	45
2007-01-16	04:39:18	68	1	7	310:41:43390:11557: 65	161	45

Figura 5.1: Muestra de datos perteneciente a la estación móvil 1 del día 16 de enero de 2007.

Tabla 5.2: Ejemplos de aplicación del método 10-fold cross validation

Número de días del conjunto fundamental	Número de Patrones	Patrones clasificados Correctamente	Patrones clasificados Incorrectamente	Eficiencia
1	1427	1427	0	100 %
2	2842	2842	0	100 %
3	4270	4270	0	100 %
5	7122	7122	0	100 %
7	8982	8981	1	99.99 %

- ⋈ Para algunas instancias, los atributos de las celdas vecinas no están disponibles y para efectos prácticos de esta tesis, se tomarán como cero para conservar la misma longitud en los vectores.
- ⋈ El tiempo de toma de muestra de cada instancia se realiza aproximadamente cada minuto, durante casi 24 horas y durante un periodo de 2 meses.

En la Figura 5.1 se puede observar una muestra de los datos contenidos dentro del banco de datos del usuario 1.

5.2.1. Resultados de las pruebas de validación del Clasificador Gamma

La primera prueba experimental que se aplicó con el algoritmo fue la prueba de validación de recuperación, en la que se utilizó el método 10-fold cross validation. Se presentan los resultados obtenidos para 5 bancos de datos en la Tabla 5.2 y los resultados de un ejemplo en la Figura 5.2.

En los resultados de validación podemos observar, que la clasificación de los conjuntos de prueba evaluados en el 10-fold cross validation es prácticamente del 100 por ciento de los datos del conjunto fundamental. Esto nos indica que al momento de aplicar el Clasificador Gamma dentro del algoritmo de predicción de handoff, su ejecución será confiable para el objetivo que se busca.

```

10-FOLD CROSS VALIDATION
Resultados del 10-FOLD CROSS VALIDATION para tetha = 0.000000
Clasificados Correctamente 8981      Porcentaje: 99.99
Clasificados Erroneamente 0          Porcentaje: 0.00
No Clasificados 1                    Porcentaje: 0.01

Resultados del 10-FOLD CROSS VALIDATION para tetha = 1.000000
Clasificados Correctamente 8982      Porcentaje: 100.00
Clasificados Erroneamente 0          Porcentaje: 0.00
No Clasificados 0                    Porcentaje: 0.00

Resultados del 10-FOLD CROSS VALIDATION para tetha = 2.000000
Clasificados Correctamente 8982      Porcentaje: 100.00
Clasificados Erroneamente 0          Porcentaje: 0.00
No Clasificados 0                    Porcentaje: 0.00

Resultados del 10-FOLD CROSS VALIDATION para tetha = 3.000000
Clasificados Correctamente 8982      Porcentaje: 100.00
Clasificados Erroneamente 0          Porcentaje: 0.00
No Clasificados 0                    Porcentaje: 0.00

Resultados del 10-FOLD CROSS VALIDATION para tetha = 4.000000
Clasificados Correctamente 8982      Porcentaje: 100.00
Clasificados Erroneamente 0          Porcentaje: 0.00
No Clasificados 0                    Porcentaje: 0.00

Proceso de 10-FOLD CROSS VALIDATION Finalizado

```

Figura 5.2: Ejemplo de resultados de validación de clasificación por medio del análisis de 10 Fols Cross Validation para un conjunto fundamental de patrones formado por 7 días de mediciones.

5.2.2. Resultados de la predicción realizada con el algoritmo propuesto

A continuación presentaremos los resultados obtenidos con el algoritmo de predicción de handoff para diferentes trayectorias de una misma estación móvil. Las pruebas se realizaron con conjuntos fundamentales de diferente cardinalidad para cada predicción, y con ello, determinar cuántos días son suficientes para obtener los resultados deseados en la predicción.

Para la trayectoria de predicción del día 18, de la estación móvil elegida, se obtienen dos curvas: la primera pertenece a la trayectoria real de la estación móvil ; y la segunda, a la predicción realizada por el algoritmo propuesto. Los datos del conjunto fundamental utilizado corresponden a 2 días anteriores al que se requiere predecir y a partir de ellos se determina la trayectoria de predicción. En las figuras 5.3 y 5.4, se destaca que existen puntos en los que la predicción no coincide con los datos originales de la trayectoria del usuario móvil. En esta prueba, la trayectoria original realiza 64 handoffs mientras que el algoritmo propuesto realiza 45 handoff, es decir, 30 por ciento menos solicitudes de ejecución de handoffs sin comprometer la calidad de la conexión.

En cuanto a **la trayectoria de predicción para el día 19** se presentan dos gráficas de los resultados obtenidos. En la primera, se observa un espectro amplio de la comparación entre las instancias de los datos de la trayectoria original de la estación móvil y en la segunda los datos obtenidos de la predicción realizada por el algoritmo propuesto (Figura 5.5 y 5.6). Para la realización de este experimento se tomó como conjunto fundamental, tres días anteriores al día requerido.

En las figuras 5.5 y 5.6, podemos observar una variación importante en las conexiones de la trayectoria del móvil. El algoritmo de predicción conecta a la estación móvil casi en las mismas celdas que



Figura 5.3: Confrontación entre datos de handoff GSM real y datos predichos por el algoritmo propuesto para el día 18 .

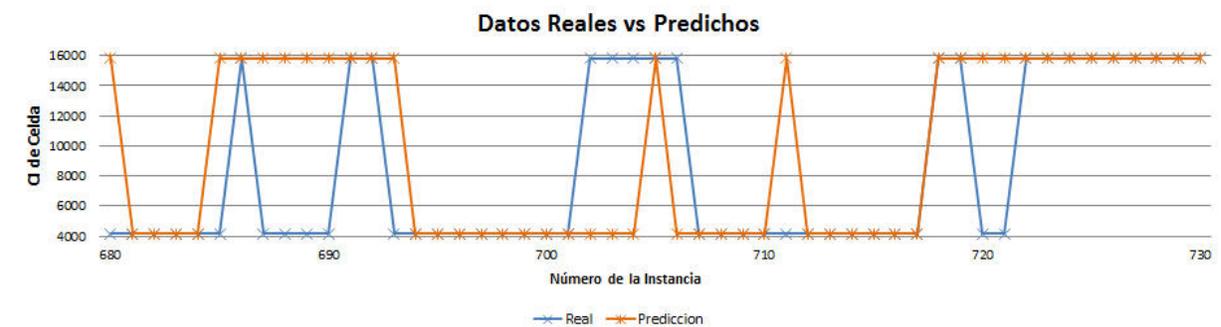


Figura 5.4: Visualización de 50 instancias de los datos reales y predichos por el algoritmo para el día 18 de la trayectoria de la estación móvil.

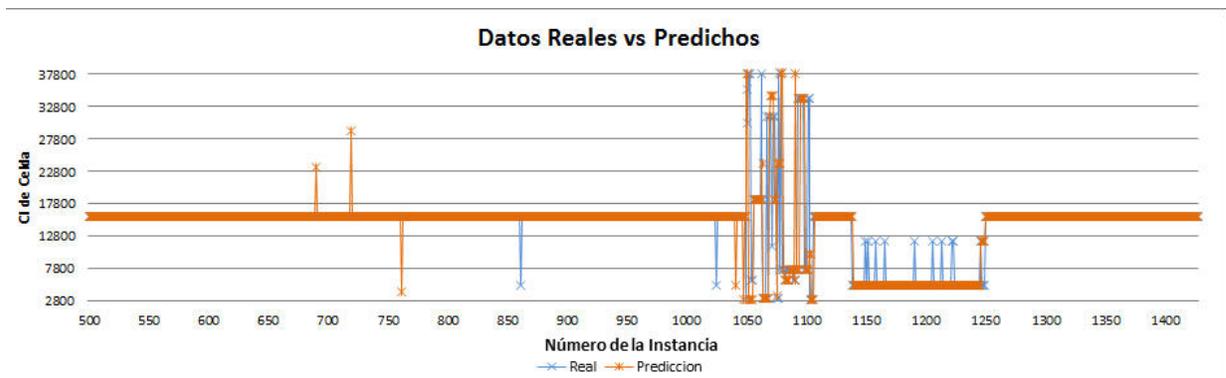


Figura 5.5: Espectro amplio para comparar los datos de handoff GSM real y datos predichos para el día 19.

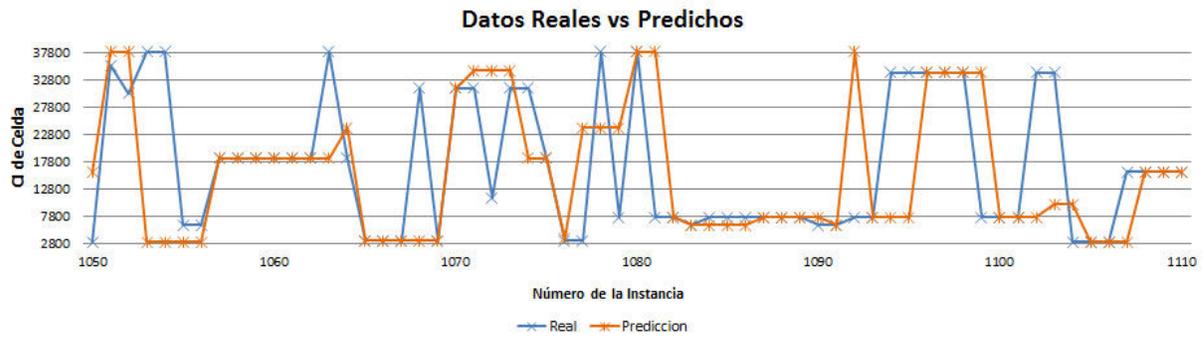


Figura 5.6: Acercamiento de 60 instancias entre los datos reales y predichos por el algoritmo para el día 19 de la trayectoria de la estación móvil.

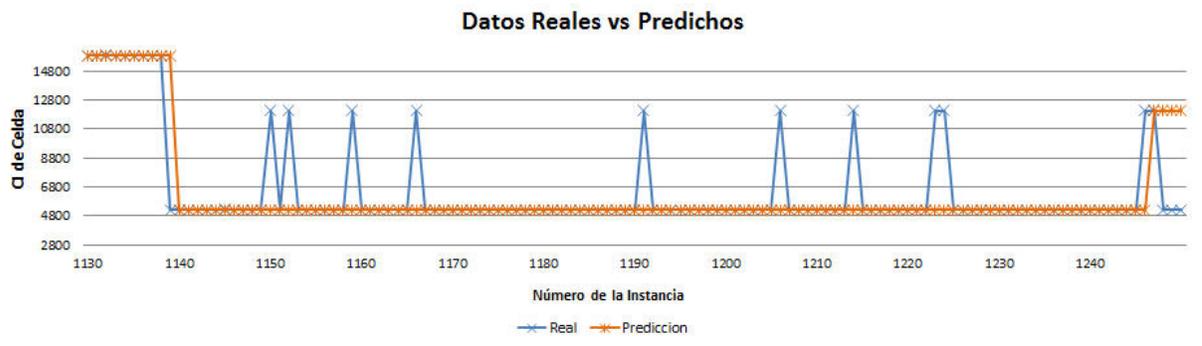


Figura 5.7: Acercamiento de 110 instancias para comparar la trayectoria original con la trayectoria predicha para el día 19 de la trayectoria de la estación móvil. La trayectoria original ejecutan handoffs innecesarios y utiliza mayores recursos de la red GSM. La predicción evita esos cambios innecesarios y así ahorrar recursos de la red.

en la trayectoria original, pero podemos ver que el algoritmo de predicción trata de conservar el mayor tiempo posible a la estación móvil en una misma celda, y así, no realizar handoffs innecesarios. La figura 5.7 muestra, entre las intancias 1140 y 1240, la ejecución repetida de handoffs en la trayectoria original, de manera continua y probablemente innecesaria.

Este último hecho sugiere que la estación móvil está en la frontera de dos celdas. Por ello, el algoritmo de predicción conserva al usuario, por el mayor tiempo posible, en la celda que le proporciona la mayor calidad de conexión. De esta manera el algoritmo de predicción realiza 43% menos ejecuciones de handoff, conservando la calidad en la conexión al no disminuir la potencia de la señal a un valor menor a -105dBm o 25, en la escala de medición en el banco de datos utilizado en esta tesis.

La predicción de **la trayectoria del día 20 de la estación móvil** destaca dos gráficas en el mismo contexto que las pruebas anteriores. Se observa nuevamente la realización de menos ejecuciones de handoff que en la trayectoria original, aproximadamente de un 35% menos peticiones de handoff (Figura 5.8 y Figura 5.9).

Consideremos ahora **la trayectoria del día 22 de la estación móvil**. En la figura 5.10 se muestra el espectro general de los patrones de los bancos de datos originales versus los datos obtenidos por

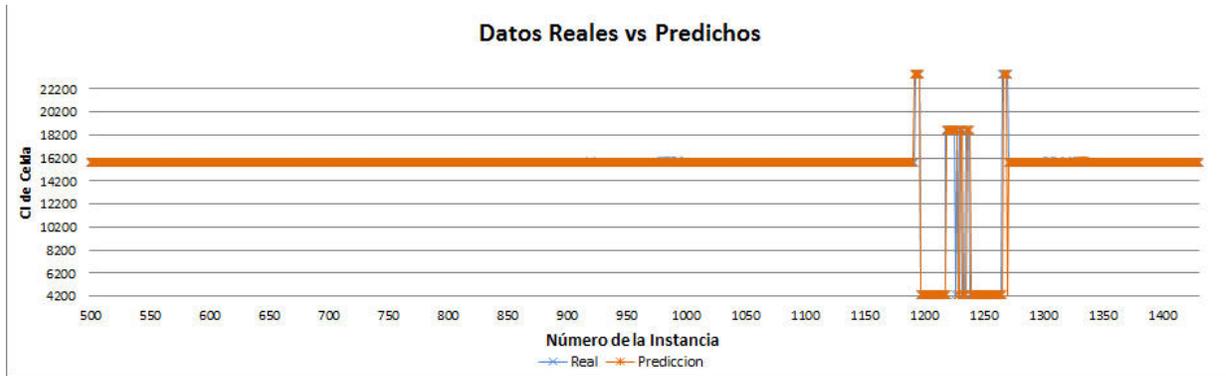


Figura 5.8: Comparación general de las instancias entre los bancos de datos originales y los datos de predicción del día 20 de la estación móvil.

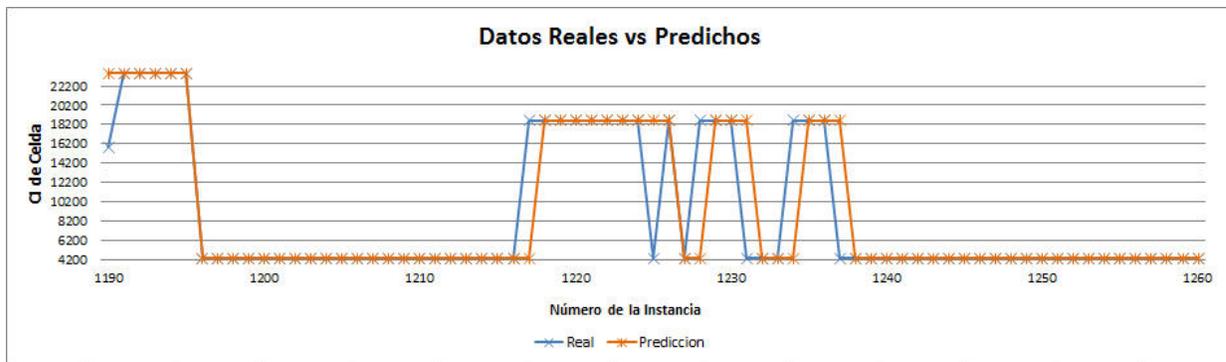


Figura 5.9: Muestra específica que compara las instancias del banco de datos original contra el banco de datos predichos para el día 20 de la estación móvil.



Figura 5.10: Espectro general de muestras de las instancias para el día 22 entre los patrones originales y los patrones predichos de la estación móvil.

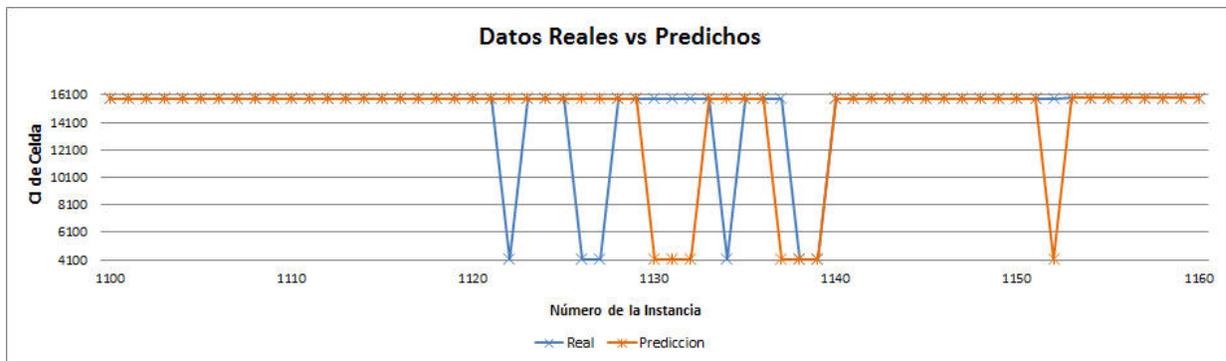


Figura 5.11: Ampliación de la confrontación de los datos entre la trayectoria original y los datos predichos de la estación móvil analizada para el día 22.

la predicción realizada. En ella, se observa que existen dos handoff ejecutados por el algoritmo de predicción que no coinciden con ningún cambio en los datos originales. Esot se debe a que el algoritmo de predicción consideró que en esos dos casos, existe una celda de mejor calidad al momento de realizar la predicción. A pesar de que se puede observar como dos ejecuciones innecesarias de un handoff, al final de la comparación, el algoritmo predictivo realiza menos ejecuciones de handoff que en el algortimo original de las mediciones.

La figura 5.11 presenta una ampliación del espectro de la figura 5.10 para observar más claramente las diferencias entre la trayectoria original del usuario móvil y la trayectoria predicha por el algoritmo propuesto.

En esta prueba se consideraron 6 días anteriores al día predicho para la conformación del conjunto fundamental del algoritmo de predicción. Se observa en este caso, que la predicción reduce en un 46 % las ejecuciones de handoff en comparación a la trayectoria original de la estación móvil.

Finalmente, presentamos la predicción para **la trayectoria del día 23 de la estación móvil**. En esta, se presenta el espectro general de las instancias de la trayectoria original del móvil, contra la trayectoria predicha (Figura 5.12). Además, se muestra un espectro más específico donde se observan los cambios más relevantes en las conexiones de la estación móvil del espectro general (Figura 5.13).



Figura 5.12: Comparación general entre la trayectoria de los datos originales y la trayectoria de los datos predichos de la estación móvil para el día 23.

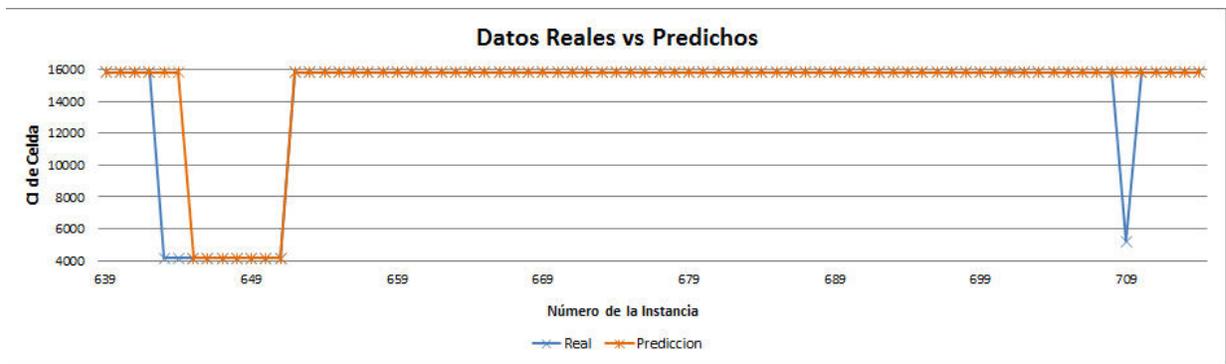


Figura 5.13: Espectro específico de los datos de la trayectoria original y los patrones de la trayectoria predicha para el día 23 de la estación móvil.

Tabla 5.3: Resumen de resultados obtenidos para 5 días distintos de predicción con diferente cardinalidad en el conjunto fundamental del algoritmo propuesto.

Día de Predicción	Num. Días tomados para conjunto fundamental	Patrones conjunto fundamental	Num. handoff Trayectoria Original	Num. handoff Trayectoria de Predicción	% Reducción de HO-Predicción vs HO-Origen
18	1	1161	64	45	29.69 %
18	2	1859	64	45	29.69 %
19	2	2125	93	53	43.01 %
19	3	3286	93	53	43.01 %
20	2	1859	34	22	35.29 %
20	4	4713	34	22	35.29 %
22	5	6142	71	38	46.48 %
22	6	7568	71	38	46.48 %
23	3	4281	85	61	28.24 %
23	6	7833	85	61	28.24 %

Una vez presentados los resultados de las pruebas realizadas, proseguiremos a analizar los resultados obtenidos y destacar las características relevantes de los mismos.

5.3. Análisis de las predicciones realizadas

Tomando en cuenta los resultados recopilados en la tabla 5.3, se observan las diferencias entre las instancias originales de las mediciones de la estación móvil y las instancias obtenidas por el algoritmo de predicción. En ellas se destaca la reducción del número de handoffs ejecutados por la trayectoria predicha con respecto a la trayectoria original, por ejemplo, de 85 handoffs realizados en la trayectoria original, se realizaron 61 handoffs en la trayectoria de predicción.

Los ejemplos de los análisis realizados con el algoritmo de predicción muestran en general, una disminución en la ejecución de handoffs durante la trayectoria de una estación móvil. Para mostrar mejor este hecho, en la tabla 5.3, se presenta un resumen de los resultados sobresalientes obtenidos en las pruebas realizadas. Se consideraron 5 días distintos con diferente cardinalidad en el conjunto fundamental para el algoritmo de predicción.

En la tabla 5.3 se destaca el número de handoffs ejecutados durante las pruebas del algoritmo propuesto, ya que es éste el parámetro considerado en la literatura actual para la comparación de la eficiencia de los algoritmos de handoff.

Con los datos de la tabla anterior podemos obtener las siguientes hechas:

- El algoritmo de predicción reduce el número de ejecuciones de handoff de entre el 20 % y el 47 % menos, respecto al número de handoffs realizados por la trayectoria original de la estación móvil.
- Dos predicciones mostradas en la tabla muestran una reducción importante en el número de handoffs ejecutados: 43 % y 46 % menos handoffs que la trayectoria original del usuario móvil.

- γ El número de handoff efectuados por el algoritmo predictivo propuesto, no muestra variaciones cuando se varía el número de patrones utilizados para el conjunto fundamental.

Además de los resultados presentados en la tabla 5.3, se observó que durante la experimentación, el tiempo de respuesta del algoritmo de predicción propuesto es en promedio de 50 milisegundos por medición ejecutada. Este hecho cumple con el tiempo de respuesta propuesto por las normas internacionales para el sistema handoff de telefonía celular GSM, el cual es de 480 milisegundos [41]. También se observó que este tiempo promedio no oscila de manera relevante, aún cuando el número de datos en el conjunto fundamental se encuentra entre los 1000 patrones y los 9000 patrones.

Otro punto a recalcar se relaciona con la calidad de la señal, la cual se conserva en un valor mayor a los -90dBm para la elección de ejecución de un handoff, lo que asegura una conexión fiable y el buen servicio para la comunicación celular; además, se encuentra dentro de los niveles que marca el estándar internacional de comunicaciones celulares para GSM [41].

5.4. Análisis del desempeño computacional

El desempeño computacional de la ejecución del algoritmo de handoff es un factor importante para su implementación en un sistema de telefonía celular, como lo es el de GSM; ya que el proceso del algoritmo ocupa una parte relevante del tráfico de información de la red.

En el caso que nos atañe, es conveniente realizar un balance entre la rapidez (menor a 480 milisegundos) y la eficiencia (buena predicción determina una comunicación continua y de calidad) del algoritmo. Esto se realiza con el objetivo de obtener los resultados necesarios para la conservación de la comunicación continua y también, el hecho de ahorrar recursos de la red de telefonía. Cumpliendo este balance, el sistema GSM puede ampliar la cobertura en el número de usuarios que pueden conectarse sin problemas a la red.

Los tiempos de implementación del algoritmo de predicción handoff propuesto se realizaron en una máquina con procesador Intel Atom de 1.6GHz de velocidad con 2 GB de memoria RAM, utilizando el programa de Microsoft Visual Studio 2010 Express y el lenguaje de programación C.

Los resultados del desempeño computacional en tiempo se muestran en la Tabla 5.4.

Se observa en la tabla 5.4 que el mayor tiempo de procesamiento se obtiene cuando los patrones del conjunto fundamental superan las 5000 instancias, a excepción del caso donde el número de instancias es menor a 5000 y se obtiene un tiempo de 55.56 milisegundos.

Este último hecho lo podemos explicar si se analiza de manera más atenta el conjunto fundamental correspondiente a esta prueba. La trayectoria de la estación móvil para ese día es complicada, ya que presenta la ejecución de 107 handoff con un número pequeño de patrones (situación que no pasa en otros días con menos ejecuciones de handoff). Considerando éstos tiempos, la ejecución del algoritmo es buena para los objetivos buscados y se encuentra dentro del estándar internacional para la telefonía celular GSM.

De esta manera, en general, se deduce que la predicción realizada con las características descritas es rápida y eficiente.

Tabla 5.4: Tiempos de procesamiento del algoritmo de predicción handoff con el Clasificador Gamma.

Número de días utilizados para generar el conjunto fundamental	Número de Clases en el conjunto fundamental	Patrones utilizados como conjunto fundamental	Tiempo (milisegundos)
6	46	7568	41.85 ms
5	44	6142	44.68 ms
4	37	4713	38.55 ms
3	14	4281	39.30 ms
3	14	3286	55.56 ms
2	7	1859	37.12 ms
1	12	1161	32.37 ms

5.5. Interpretación de las gráficas

Las gráficas presentadas con los resultados obtenidos muestran la comparación entre los patrones de la trayectoria original de la estación móvil analizada y los patrones de la trayectoria predicha por el algoritmo propuesto. Además, las gráficas muestran un espectro más específico de la trayectoria total de un usuario con el objetivo de subrayar aquellas zonas en las que se observan numerosas ejecuciones de handoff entre la trayectoria original y la predicha.

En todas las gráficas el eje de las abscisas representa el rango considerado entre los patrones disponibles en la trayectoria de la estación móvil analizada; y en el eje de las ordenadas, se muestra el identificador de celda (CI) para cada patrón considerado, en el análisis correspondiente.

Las escalas de las gráficas varían de acuerdo al número de patrones considerados en cada comparación realizada, y también de acuerdo al valor de los identificadores de celda incluidos en la muestra analizada de la estación móvil.

Tomando en cuenta las condiciones consideradas para la realización de las pruebas con el algoritmo propuesto y la manera de interpretar las gráficas que se presentaron en las secciones anteriores, se describieron los resultados de varias predicciones realizadas con diferentes conjuntos fundamentales de información.

Así finalizamos la presentación y análisis de resultados del algoritmo propuesto en esta tesis para dar lugar a las conclusiones que se pueden deducir de ellos, mismas que se presentan en la siguiente sección.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

En este capítulo se mencionan las conclusiones generales de la presente tesis. Adicionalmente, se presentan propuestas de posibles trabajos futuros relacionados con las aportaciones realizadas.

6.1. Conclusiones

Los resultados del estudio sobre la aplicación del algoritmo de predicción handoff propuesto, muestran que la ejecución de decisión de handoff se realizó de una manera no convencional, empleando como parámetro de arranque, la fuerza de la señal de recepción (RSS). Adicionalmente, se utilizaron los parámetros de RSS de las celdas de conexión antes usadas por el usuario (conjunto fundamental de la estación móvil) de uno o varios días anteriores a la predicción requerida.

Se realizaron pruebas de validación al algoritmo de predicción de handoff propuesto por medio del método 10-fold cross validation. Los resultados de este análisis fueron satisfactorios, ya que en la mayoría de los casos se obtuvo 100 % de recuperación de los patrones de prueba sometidos al análisis. Esto muestra que el desempeño de clasificación en la aplicación del método propuesto es confiable y eficiente.

El uso de la trayectoria del móvil (incluido en el conjunto fundamental del Clasificador Gamma) como parámetro de predicción es de gran relevancia, ya que existen pocos casos en la literatura que lo utilicen como parámetro de análisis en el handoff [29]. Aplicando este parámetro, los resultados mostraron ser satisfactorios cumpliendo con los requerimientos de los estándares internacionales y mejorando se desempeño en comparación al método tradicional de decisión de handoff por RSS.

La predicción del handoff de la estación móvil, en caso de requerirse, se realizó de manera exitosa tomando en cuenta los parámetros de medición tradicional (RSS) y el conjunto fundamental de la trayectoria del móvil de días anteriores (historial). La predicción se realizó en un tiempo menor a los 100 milisegundos, lo que representa un buen tiempo de respuesta del algoritmo de handoff. Gracias a la predicción anticipada, se asegura la conectividad de las estaciones móviles en la red con antelación suficiente.

La comparación entre los datos predichos y los datos originales del banco de datos origen, caracterizan una mejora en la ejecución de la decisión de realizar o no un handoff. Esto se asevera debido a que en todos los casos en que se aplicó el algoritmo de predicción, se reduce considerablemente el

número de ejecuciones de handoff de entre el 20 % y 45 %, sin perjudicar la calidad en las conexiones de la estación móvil con la red de telefonía.

La disminución del número de handoff ejecutados en una trayectoria dada de la estación móvil, se traduce en el ahorro de recursos de la red de telefonía y se maximiza la reutilización de recursos de la misma.

Concluyendo, podemos decir que la aplicación del Clasificador Gamma, como herramienta para la predicción en la decisión del handoff, es un aporte importante innovador en el empleo de la inteligencia artificial, y en particular de las memorias asociativas, para resolver problemas de comunicaciones inalámbricas, como es el caso del algoritmo de handoff; además de que el modelo propuesto no sustituye a los sistemas handoff actuales, sino más bien los fortalece.

6.2. Trabajo a Futuro

Se sugiere la aplicación del método propuesto incluyendo otros parámetros de medición de algoritmos de handoff aplicados en los sistemas comerciales, como puede ser: shadow fading, tráfico de la red, saturación del canal de llamada, probabilidad de error de handoff o la calidad de la llamada.

Se propone implementar el algoritmo de este trabajo de tesis con datos reales de una red de telefonía celular real GSM. Esta probable aplicación futura es viable, debido a que el algoritmo propuesto predice la conexión a la siguiente de celda en tiempo real, cumpliendo con los estándares internacionales.

Glosario

BER	Tasa de error en el bit (Bit error rate)
BSIC	Código de identificación de la estación base
CGI	Identificación Global de Celda
dB	Decibel
dBc	Decibeles referidos a la portadora
dB _i	Decibeles referidos a una antena isótropa
dB _m	Decibeles referidos a 1 mW
dBW	Decibeles relativos a un Watt
DRX	Recepción discontinua (discontinuous reception)
DTX	Transmisión discontinua (discontinuous transmission)
DTX_USED	Indicador de reporte de mediciones del usuario
EB	Estación base transmisora y receptora
ET	Equipo Terminal, puede ser Móvil, Semi-Fijo, Fijo o Portátil.
EQX	Canal de igualación a una velocidad
FACCH	Canal asociado de control rápido (Fast Associated Control Channel)
FACCH/F	Canal asociado de control rápido a máxima velocidad (Fast Associated Control Channel Full Rate)
FACCH/H	Canal asociado de control rápido a velocidad media (Fast Associated Control Channel / Half Rate)
FCC	Comisión Federal de Comunicaciones (Federal Communications 57 Commission)
FER	Velocidad de borrado de trama (Frame Erasure Rate)
FH	Salto de frecuencia (Frequency Hopping)
FI	Frecuencia intermedia
FN	Número de trama (Frame Number)
GHz	Gigahertz
GSM	Sistema global de comunicaciones móviles (Global System for Mobile Communications)
Inter. EB	Dentro de la misma célula EB
Intra. EB	Fuera de la célula EB
kbps	Kilo bits por segundo
kHz	Kilohertz
KPa	KiloPascales
MHz	Megahertz
MS_TXPWR_MAX_CCH	Comando de transmisión de potencia máxima del terminal en el canal de control

mW	miliwatt
nW	nanowatt
P	Potencia media transmitida de la portadora
PCH	Canal de búsqueda (Pagigng Channel)
PCS	Sistema de Comunicación Personal (del inglés personal communications system)
PIRE	Potencia isotrópica radiada efectiva (Effective Isotropic Radiated Power)
ppm	Partes por millón
PRE	Potencia radiada efectiva
RACH	Canal de acceso aleatorio (Random Access Channel)
RADIO_LINK_TIMEOUT	Modo de espera de radioenlace
RAx	Acceso remoto (Remote access)
RBER	Tasa de error de bit residual (Residual Bit Error Ratio)
RICE	Distribución exponencial con componente directa
RDSI	Red digital de servicios integrados
RE	Inicialización y activación del algoritmo
	RADIO_LINK_TIMEOUT
RF	Radio frecuencia
RMA	Valor cuadrático medio
RSS	Potencia de la señal recibida
RTPC	Red Telefónica Pública Conmutada
RXLEV	Nivel de recepción
RXQUAL	Calidad del receptor
RXQUAL_FULL	Calidad del receptor a tráfico completo
RXQUAL_SUB	Calidad del receptor basada en 12 tramas TDMA
s	Nivel de sensibilidad de referencia
S	Contador de radioenlace
SACCH	Canal asociado de control lento (Slow Associated Control Channel)
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
SDCCH	Canal de control dedicado de señalización (Stand-alone Dedicated Control Channel)
SFH	Salto lento en frecuencia (Slow Frequency Hopping)
TDMA	Acceso multiple por división de tiempo
TN	Tiempo de Ranura (Time Number)
Tx	Transmisión
UIT	Union Internacional de Telecomunicaciones
v	Velocidad
VSWR	Relación de tensión de onda estacionaria (Voltage Standing Wave Ratio)
W	Watt
3GPP	Proyecto de Colaboración de la Tercera Generación (del inglés Third Generation Partnership Project)

Referencias

- [1] W. R. Young and D. H. Ring, "Mobile telephony, wide area coverage," tech. rep., Technical Report for Bell Laboratories, 1947.
- [2] J. Joel, "Mobile communication system," 1973.
- [3] M. Siegmund, K. W. Matthias, and W. O. Malcom, *GSM and Personal Communications Handbook*. Artech House Press, 1998.
- [4] Z. Qing-an and P. A. Dharma, *Handbook of Wireless Networks and Mobile Computing*. 2002.
- [5] T. 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Series 36 evolved universal terrestrial radio access (e-utra)," 2010.
- [6] K. Pahlavan, P. Krishnamurthy, and A. Hatami, "Handoff in hybrid mobile data networks," *IEEE Personal Communications*, pp. 34–47, 2000.
- [7] M. H. Hassoun, *Associative Neural Memories*. Oxford University Press, 1993.
- [8] W. McCulloch and W. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity," *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, pp. 115–133, 1943.
- [9] G. X. Ritter and P. Sussner, "An introduction to morphological neural networks," in *Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition*, 1996.
- [10] F. Rosenblatt, "The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain," *Psychological Review*, vol. 65(6), pp. 386–408, 1958.
- [11] B. Widrow and M. A. Lehr, "30 years of adaptive neural networks: Perceptron, madaline and backpropagation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 78(9), pp. 1415–1441, 1990.
- [12] P. J. Werbos, "Backpropagation through time: What it does and how to do it," *Proceedings of the IEEE*, vol. 78(10), pp. 1550–1560, 1990.
- [13] J. J. Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 79, pp. 2554–2558, 1982.
- [14] M. Minsky and S. Papert, *Perceptrons*. MIT Press ,Cambridge, 1969.
- [15] K. Steinbuch, "Die lernmatrix," *Kybernetik*, vol. 1(1), pp. 36–45, 1961.
- [16] J. A. Anderson, "A simple neural network generating an interactive memory," *Mathematical Biosciences*, vol. 14, pp. 197–220, 1972.
- [17] T. Kohonen, "Correlation matrix memories," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 4, pp. 353–359, 1972.

- [18] B. Kosko, "Bidirectional associative memorie," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 18(1), pp. 49–60, 1988.
- [19] C. Yáñez-Márquez, "Memorias asociativas basadas en relaciones de orden y operadores binarios," *Tesis Doctoral, CIC-Instituto Politécnico Nacional, México.*, 2002.
- [20] I. López-Yáñez, "Clasificador automático de alto desempeño," Master's thesis, Centro de Investigación en Computación, 2007.
- [21] <http://crawdad.cs.dartmouth.edu/>, "Community resource for archiving wireless data at dartmouth (crawdad)," July 2007.
- [22] G. Heide, *GSM Networks: Protocols, Terminology, and Implementations*. Artech House Press, 1999.
- [23] M. Stemm, "Vertical handoffs in wireless overlay networks," tech. rep., University of California at Berkeley, CA, 1996.
- [24] M. Gorricho-Moreno and O. Antoni, *Comunicaciones Móviles*. Publicado por Ediciones UPC, 2002.
- [25] V. Toledo, "Análisis y diseño de mecanismos de handoff en redes inalámbricas de banda ancha ieee 802.16e," Master's thesis, Universidad Autónoma de México, 2009.
- [26] M. Juha-Pekka, "Effects of handoff algorithms on the performance of multimedia wireless networks," tech. rep., Faculty of Technology, Department of Electrical and Information Engineering, University of Oulu, 2008.
- [27] M. Akar and U. Mitra, "Soft handoff algorithms for cdma celular networks," *IEEE Transactions on Wireless Commmunications*, vol. 2(6), pp. 1259–1274, 2003.
- [28] L. Tsungnan, W. Chiapin, and L. Po-Chiang, "A neural network based context-aware handoff algorithm for multimedia computing," *ICASSP IEEE*, pp. 1129–1132, 2005.
- [29] R. Suleesathira and S. Kunarak, "Neural network handoff in shadow-rayleigh fading," *IEEE Transactions on Wireless Commmunications*, pp. 5146–5149, 2005.
- [30] S. Mitra and S. DasBit, "Neural network based precise location identification in a cellular mobile," pp. 403 – 407, jan. 2005.
- [31] L. Kuen-Rong, C. Chung-Ju, and B. Shung, "A neural fuzzy resource manager for hierarchical cellular systems supporting multimedia services," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 52(5), pp. 1196–1206, 2003.
- [32] O. Lázaro and D. Girma, "A hopfield neural-network-based dynamic cannel allocation whit handoff cannel reservation control," *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 49(5), pp. 158–1587, 2000.
- [33] A. W. Chang and R. S. Ramakrishna, "Qos provisioning dynamic connection-admission control for multimedia wireless networks using a hopfield neural network," *IEEE Transactions on vehicular Technology*, vol. 53(1), pp. 106–117, 2004.
- [34] R. Narasimhan and D. Cox, "A handoff algorithm for wireless systems using pattern recognition," vol. 1, pp. 335 –339 vol.1, sep 1998.
- [35] Q. Guo, J. Zhu, and X. Xu, "An adaptive multi-criteria vertical handoff decision algorithm for radio heterogeneous network," vol. 4, pp. 2769 – 2773 Vol. 4, may 2005.

- [36] M. E. Cruz-Meza, "Aprendizaje y recuperación de imágenes en color mediante memorais asociativas alfa-beta," Master's thesis, Centro de Investigación en Computación, 2006.
- [37] G. d. l. L. Sáenz-Morales, "Predicción de contaminantes atmosféricos mediante el clasificador gamma," Master's thesis, Centro de Investigación en Computación, 2010.
- [38] K. Rosen, *Discrete Mathematics and Its Applications*. McGraw-Hill, 1999.
- [39] I. López-Yáñez, A. J. Arguelles-Cruz, O. Camacho-Nieto, and C. Yáñez-Márquez, "Pollutants time-series prediction using the gamma classifier," *Atlantis Press*, pp. 680–711, 2011.
- [40] H. Walke Bernhard, *Mobile Radio Networks: Networking and Protocols*. Jhon Wiley & Sons Ltd., 1999.
- [41] "Digital cellular telecommunications system (phase2); numbering, addressing and identification."
- [42] M. Stone, "Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions," *Roy. Stat. Soc.*, vol. 36, pp. 111–147, 1974.