

Universidad de Málaga  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación



TESIS DOCTORAL

Bayesian modelling of fault diagnosis in mobile communication  
networks

Modelado bayesiano de la diagnosis de fallos en redes de comunicaciones  
móviles

XXVIII Premios “Ingenieros de Telecomunicación”

Autora: RAQUEL BARCO MORENO

Directores: LUIS DÍEZ DEL RÍO, VOLKER WILLE

Presentación: Mayo 2007

Calificación: Sobresaliente “Cum Laude”. Mención de Doctorado Europeo



# Contents

<b>1 Descripción del trabajo</b>	<b>7</b>
1.1 Origen . . . . .	7
1.1.1 Motivación . . . . .	7
1.1.2 Antecedentes . . . . .	8
1.2 Objetivos . . . . .	8
1.3 Desarrollo . . . . .	9
1.3.1 Antecedentes . . . . .	9
1.3.2 Modelado de la diagnosis de fallos . . . . .	10
1.3.3 Evaluación . . . . .	11
1.4 Conclusiones . . . . .	12
<b>2 Originalidad</b>	<b>13</b>
2.1 Estado del arte . . . . .	13
2.2 Contribuciones . . . . .	13
<b>3 Resultados</b>	<b>17</b>
3.1 Indicadores de calidad . . . . .	17
3.2 Resultados técnicos . . . . .	17
<b>4 Aplicabilidad</b>	<b>21</b>
<b>A Anexo: Proyectos relacionados</b>	<b>25</b>
<b>B Anexo: Publicaciones</b>	<b>27</b>
<b>C Anexo: Referencias al trabajo por parte de otros investigadores</b>	<b>31</b>
<b>D Anexo: Desarrollo comercial</b>	<b>33</b>



## Acrónimos

**3G:** Third Generation

**BC:** Bayesian Classifier

**BDF:** Beta Distribution Function

**BMAP:** Beta Maximum a Posteriori

**BN:** Bayesian Network

**EDGE:** Enhanced Data Rates for Global Evolution

**EMD:** Entropy Minimization Discretization

**ESA:** European Space Agency

**FD:** Fault Detection

**fdp:** función densidad de probabilidad

**GERAN:** GSM/EDGE Radio Access Network

**GPRS:** General Packet Radio Service

**GSM:** Groupe Spécial Mobile, Global System for Mobile Communication

**KPI:** Key Performance Indicator

**MUI:** Multiple Uniform Intervals

**NMS:** Network Management System

**OPEX:** Operational Expenditure

**RAN:** Radio Access Network

**RAT:** Radio Access Technology

**SBM:** Simple Bayes Model

**SBN:** Smooth Bayesian Network

**SEMD:** Selective Entropy Minimization Discretization

**TS:** Troubleshooting

**TST:** Troubleshooting Tool

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunications Service

**WLAN:** Wireless Local Area Network



# 1 Descripción del trabajo

## 1.1 Origen

### 1.1.1 Motivación

Durante las últimas décadas las comunicaciones móviles han jugado un papel creciente dentro del negocio de las telecomunicaciones y, previsiblemente, lo continuarán haciendo en los próximos años. En los últimos años las redes 3G, han empezado a desplegarse en todo el mundo. En un futuro cercano, se espera que los servicios móviles estén disponible *en cualquier parte en cualquier momento*. Los usuarios navegarán por la web, leerán sus correos, se bajarán ficheros o tendrán una videoconferencia en tiempo real, en un centro comercial, un aeropuerto o en su casa. Las redes de comunicaciones móviles Beyond 3G (B3G) comprenderán un conjunto de redes inalámbricas interrelacionadas, aplicaciones con gran ancho de banda y usuarios que demandarán servicios de alta calidad a bajos precios, y todo con un espectro limitado. En estas redes, el acceso podrá llevarse a cabo mediante distintas tecnologías (Radio Access Technology, RAT), como GSM, UMTS y WLAN.

Una vez que una red ha experimentado la mayor parte de su despliegue, el mayor coste para los operadores está asociado a la operación de dicha red. Hasta ahora, la mayoría de las tareas de operación de red se han llevado a cabo de forma manual, requiriendo personal dedicado, con la consecuente inflexibilidad y retardo de respuesta. Sin embargo, en la actualidad los operadores de red están mostrando un nivel creciente de interés en automatizar las actividades de gestión de red. Esto ha estimulado una intensa actividad de investigación en el campo de las redes auto-gestionadas (*self-managing networks*). En este contexto, la propiedad de auto-gestión hace referencia a la capacidad de la red de configurarse, protegerse, curarse y organizarse de forma automática. Dentro de este marco se encuentran estudios recientes en el campo de la automatización y optimización de la red de acceso radio (Radio Access Network, RAN). En este escenario, esta tesis se centra en la automatización de la gestión de fallos.

Cualquier red consta de numerosos equipos distribuidos a lo largo de todo el país, por lo que mantener y operar este complejo sistema es una tarea difícil que requiere personal de forma permanente en muchas oficinas regionales. Además, debido al gran tamaño de las redes, es frecuente que algún equipo no funcione como estaba planeado. La consecuencia en ese caso es la prestación de un servicio deficiente a los usuarios finales. Como, en la mayoría de los países, diversos operadores compiten por los clientes, es fundamental solucionar dichos problemas inmediatamente porque de otra forma los usuarios se cambiarán a redes de la competencia. Por tanto, la gestión de fallos, también llamada resolución de problemas (*troubleshooting*, TS), es un aspecto clave de la operación de un sistema de comunicaciones móviles en un entorno competitivo. Como la RAN de los sistemas celulares es la parte más importante de la red, la mayor parte de las actividades de TS se concentran en este área.

El TS engloba la localización de las celdas con fallos (*detección de fallos*), la identificación de las causas de esos fallos (*diagnosis*) y la propuesta y realización de acciones correctivas (*recuperación de fallos*). Actualmente, en la mayoría de las redes celulares, el TS es un proceso manual, llevado a cabo por expertos en la RAN. Su tarea consiste en resolver los problemas de la red que han sido detectados previamente por otro personal de la empresa o por rutinas automáticas de chequeo. Durante el procedimiento de TS, se deben consultar múltiples aplicaciones y bases de datos para analizar los indicadores de funcionamiento, la configuración y las alarmas de las celdas.

El objetivo principal de esta tesis es el estudio y diseño de un sistema de gestión automática de fallos para la RAN de redes de comunicaciones móviles. En particular, la mayor parte de la tesis se centra en la diagnosis, que es la tarea más compleja dentro de la gestión de fallos y la que

requiere más tiempo. Sorprendentemente, existen muy pocas referencias bibliográficas sobre la diagnosis automática en la RAN de redes celulares, a pesar del enorme interés en el tema que han mostrado operadores y fabricantes de comunicaciones móviles.

### 1.1.2 Antecedentes

En el año 2000 Nokia Networks abrió un Centro de Competencias de Comunicaciones Móviles en el *Parque Tecnológico de Andalucía* (PTA) en Málaga. Este centro se creó en el marco de un acuerdo de cooperación entre Nokia y la Universidad de Málaga (en particular con el *Grupo de Ingeniería de Comunicaciones*). El personal se componía de personal con experiencia de Nokia, nuevos empleados y profesores de la universidad.

Uno de los proyectos que se empezó en el nuevo centro de Nokia fue un proyecto de gestión automática de fallos en redes de acceso de sistemas celulares. La tarea era complicada y prometedora al mismo tiempo, puesto que no existían estudios previos sobre el tema. Además, se trataba de tema multidisciplinar para el que no sólo se requerían conocimientos de comunicaciones móviles, sino también de inteligencia artificial. El grupo de trabajo para dicho proyecto se componía de personal en España, Inglaterra y Dinamarca. Mi responsabilidad fue la parte de investigación del proyecto, lo cual constituyó el punto de partida de esta tesis. La aplicabilidad práctica de esta tesis queda patente en el hecho de que no sólo estuve implicada en investigación, sino también en la especificación de prototipos y en reuniones con operadores de redes celulares.

En Junio de 2003 Nokia cerró su centro de Málaga y, por tanto, el proyecto de gestión de fallos también desapareció. No obstante, como la definición de un sistema de gestión automática de fallos seguía siendo un asunto pendiente en redes celulares actuales y futuras, la tesis se orientó en esta línea.

Algunos meses después, otros proyectos dieron soporte a esta tesis. En primer lugar, el proyecto del Plan Nacional de Investigación (MCYT) llamado “Desarrollo de herramientas de optimización de los recursos radio en redes de comunicaciones móviles” (2003-2006) incluía tres líneas, una de las cuales era la gestión automática de fallos, cuyo resultado inmediato ha sido esta tesis. En segundo lugar, el proyecto EUREKA-Celtic llamado “*Gandalf: Monitoring and self-tuning of RRM parameters in a multi-system network*” fue llevado a cabo por un consorcio compuesto por France Telecom R&D, la Universidad de Limerick, Telefónica R&D, Moltzen Intelligence Software y la Universidad de Málaga. Un tercio del proyecto consistía en la gestión automática de fallos. En ambos proyectos fui responsable de las tareas de investigación relacionadas con la gestión automática de fallos.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es el diseño de un sistema automático de gestión de fallos para la red de acceso radio de redes de comunicaciones móviles. La Fig.1 resume el escenario y la localización de los objetivos específicos (cajas cuadradas amarillas) de esta tesis. En primer lugar, un *caso* se define como un conjunto compuesto por una causa y el valor de sus síntomas. Como se observa en la Fig.1, los casos pueden obtenerse de dos fuentes: una red real y un simulador de casos. En este punto, uno de los objetivos de esta tesis (5.a en la figura) es definir métodos para simular casos. Los casos se pueden usar para dos propósitos distintos: i) como ejemplos de entrenamiento para aprender los parámetros de un modelo o, ii) como casos de test para realizar un diagnóstico. En el primer caso, otro objetivo de esta tesis se encuentra en (4.a): diseñar métodos para aprender los parámetros del modelo basándose en casos de entrenamiento. Alternativamente, los parámetros del modelo pueden ser definidos por expertos en diagnosis. Por tanto, otro objetivo (4.b) es desarrollar técnicas para facilitar la adquisición

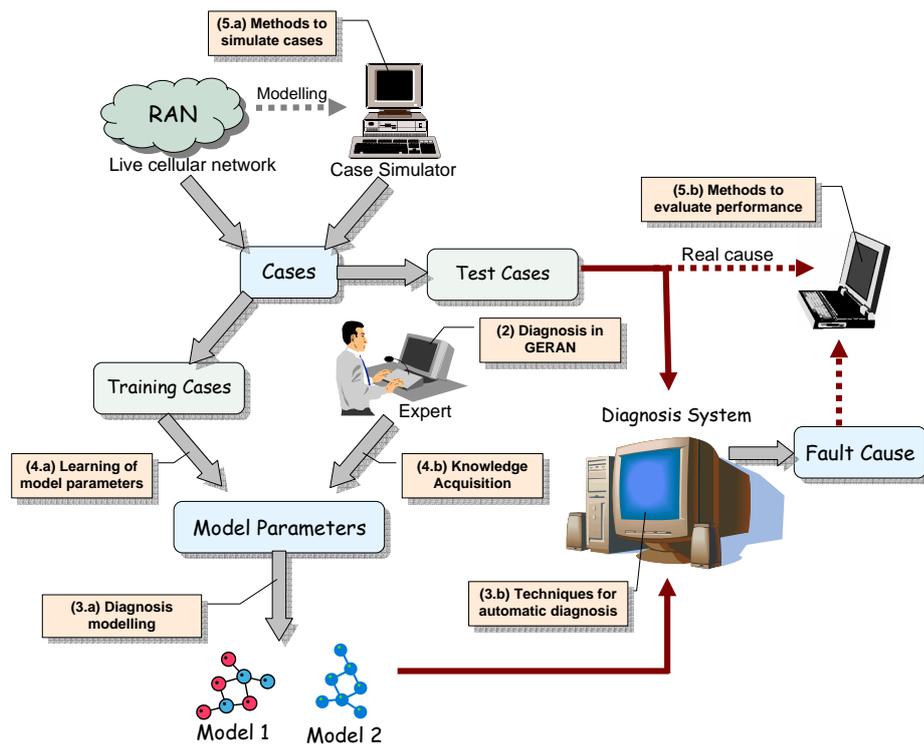


Figure 1: Objetivos de la tesis

del conocimiento. Los expertos construirán modelos específicos para cada tecnología de acceso radio. Como caso de estudio se ha elegido GERAN, situándose la definición del modelo concreto para esta tecnología en el objetivo (2). Otro objetivo (3.a) es la propuesta de distintas técnicas para modelar la diagnosis. En la Fig.1 se han representado varios modelos (Model 1, Model 2), que se diferencian en la técnica de modelado aplicada para construirlos. Una vez que se ha definido el modelo y se han incorporado sus parámetros, el sistema de diagnosis usa el modelo para identificar la causa del fallo. En este punto, otro objetivo de la tesis (3.b) es definir métodos para automatizar el proceso de diagnosis. Las entradas al sistema de diagnosis son los casos de test. Para evaluar el funcionamiento del sistema, su salida, es decir la causa diagnosticada, se compara con la causa real. En este punto, un objetivo (5.b) es la definición de métodos para evaluar y comparar los sistemas de diagnosis. Además de los objetivos mostrados en la Fig.1, un objetivo preliminar es el análisis del estado del arte (1).

### 1.3 Desarrollo

Tras el primer capítulo, donde se describe el origen de la tesis, su motivación y objetivos y la organización de la memoria, la tesis se organiza en tres partes, que se describen a continuación.

#### 1.3.1 Antecedentes

El Capítulo 2 presenta el marco teórico en el que se sitúa la tesis. En primer lugar, se presenta la automatización y optimización de la gestión de red como la mejor forma de reducir costes operacionales (OPEX) en las actuales redes de comunicaciones móviles de creciente complejidad. En particular, se introduce la gestión de fallos y se realiza un análisis de cómo se lleva a cabo en

las redes actuales. A continuación, se analiza el estado del arte en automatización de la gestión de fallos. Finalmente, se propone un procedimiento para automatizar la gestión de fallos y se presenta el escenario donde se localizaría el sistema automático.

En el Capítulo 3, se realiza un estudio sobre técnicas usadas para la diagnosis automática en otras áreas de conocimiento. En particular, se investigan aquellos sistemas basados en el conocimiento capaces de modelar la incertidumbre. De entre todas estas técnicas se justifica la elección de la aproximación bayesiana adoptada en esta tesis. En la segunda parte de este capítulo, se presenta una breve introducción a las Redes Bayesianas.

### 1.3.2 Modelado de la diagnosis de fallos

En la segunda parte de la tesis se presentan sus principales aportaciones. El objetivo es diseñar un sistema de diagnosis para la RAN de sistemas de comunicaciones móviles, el cual se compone de dos partes fundamentales: un modelo y un método de inferencia. El *modelo* representa el conocimiento del experto sobre el dominio de aplicación, en este caso el conocimiento de expertos sobre cómo se lleva a cabo la identificación de la causa de los problemas en la RAN. Hay dos aspectos involucrados en la construcción del modelo: la información sobre el dominio de aplicación (*base de conocimiento*) y su *representación*. El *método* es el algoritmo de inferencia que identifica la causa de los problemas basándose en la evidencia disponible.

Aunque como caso de estudio se ha elegido la diagnosis en redes GSM/GPRS, los modelos y métodos que se proponen son también válidos para otros sistemas celulares con sólo cambiar los elementos del modelo (es decir, la base de conocimiento).

El Capítulo 4 estudia la base de conocimiento sobre diagnosis en redes GSM/GPRS, es decir, se analiza en qué consiste la diagnosis en este tipo de redes. Para ello, se identifican y relacionan las principales causas de problemas en redes GSM/GPRS, sus síntomas y parámetros relacionados. Como aplicación se presentan casos de estudio de redes reales.

En el Capítulo 5 se investigan representaciones del modelo y métodos bayesianos de inferencia. En primer lugar, se describen los elementos que deben incluir todos los modelos y se explica cómo modelar estos elementos mediante variables aleatorias, algunas continuas y otras discretas. Se resalta que una de las mayores dificultades encontradas en el modelado se debe a que los indicadores de funcionamiento (KPIs) son variables continuas. Se han distinguido dos clases de modelos, según los KPIs se modelen como variables aleatorias continuas o discretas: el clasificador bayesiano y las redes bayesianas.

### Clasificador Bayesiano

El primer sistema que se propone consiste en un *clasificador bayesiano*. El clasificador bayesiano es uno de los clasificadores más eficientes, ya que, a pesar de ser muy simple, sus resultados son competitivos con el resto de los clasificadores actuales.

Se estudia cómo utilizar el clasificador para la diagnosis, sus limitaciones y los elementos de los que consta el modelo. Además, se investiga cómo obtener las funciones densidad de probabilidad (fdp) necesarias para el modelado, demostrando que las fdp de los síntomas dadas las causas pueden modelarse de forma bastante precisa utilizando fdp beta.

### Redes Bayesianas

Las *Redes Bayesianas* (BNs) han sido propuestas por muchos autores como la técnica de modelado para el desarrollo de sistemas de diagnosis. Una BN representa gráficamente de forma eficiente una distribución de probabilidad conjunta sobre un conjunto de variables aleatorias.

Una de las principales ventajas de las BNs es que proporcionan una representación natural y eficiente del razonamiento bajo incertidumbre.

En la definición del modelo mediante BNs, la tesis se ha desarrollado en las siguientes fases:

1. Uno de los inconvenientes de las BNs es la dificultad de construir modelos complejos. Por eso, una técnica usada a menudo para simplificar el modelado es asumir una estructura de red, es decir, suponer ciertas relaciones de independencia entre las variables. De esta forma el problema se convierte en la especificación de los nodos y tablas de probabilidad de una determinada BN. Gracias a esto, no sólo se simplifica la definición del modelo, sino también los algoritmos de inferencia. En este contexto, se han estudiado posibles estructuras de BN adecuadas para la diagnosis en redes de comunicaciones móviles.
2. Las BNs discretas son más sencillas que las continuas. Por este motivo, son las utilizadas con mayor frecuencia en aplicaciones reales. Por tanto, en el caso bajo estudio es necesaria una discretización de los indicadores de funcionamiento continuos. En este punto se han investigado métodos para discretizar los indicadores de funcionamiento en base a casos de entrenamiento.
3. Una vez que las variables continuas se han discretizado, la siguiente dificultad radica en la definición de las tablas de probabilidad de la BN. Por eso, a continuación se han estudiado métodos para aprender las tablas de probabilidad de las BNs a partir de ejemplos de entrenamiento.
4. A diferencia de otros campos de aplicación, como la diagnosis en medicina donde existen grandes bases de datos con casos reales, en diagnosis de sistemas celulares, al ser un área nueva, es difícil conseguir casos de entrenamiento. Por eso, en muchas ocasiones los modelos se basan únicamente en el conocimiento de expertos en diagnosis en redes de acceso celulares. Debido a las dificultades para establecer los parámetros (umbrales de discretización y probabilidades) del modelo de diagnosis, se han desarrollado métodos que pretenden aumentar la precisión del sistema cuando los parámetros son inexactos.

## **Adquisición del conocimiento**

Normalmente los expertos en diagnosis no conocen las técnicas de modelado (BN, clasificador bayesiano, etc.). Por tanto, es necesario convertir las especificaciones proporcionadas en lenguaje natural por los expertos en un modelo de diagnosis. En este contexto, se han desarrollado técnicas que, de forma automática, construyan los modelos bayesianos a partir del conocimiento de expertos en diagnosis en sistemas celulares.

### **1.3.3 Evaluación**

El Capítulo 6 se dedica a la evaluación de los modelos y métodos para la diagnosis propuestos en esta tesis. En primer lugar, para evaluar y comparar las distintas alternativas presentadas en el Capítulo 5 se requiere un conjunto de casos de referencia que incluyan el valor de los síntomas y la causa real para cada celda problemática. Por eso, en el Capítulo 6, se propone un procedimiento para generar un número arbitrario de casos simulados, en base a datos de entrenamiento de una red real y en la aproximación de las fdp como funciones beta.

A continuación se describen los factores de mérito considerados para evaluar los distintos sistemas: porcentaje de acierto, error en el diagnóstico, probabilidad de la causa correcta, número de orden de la causa según su probabilidad, etc. Además de las anteriores medidas, otro parámetro importante para medir la calidad de un determinado sistema de diagnosis es la

sensibilidad de sus resultados a cambios en los parámetros. Así, un sistema será tanto mejor cuanto menos sensibles sean sus conclusiones a una definición inexacta de sus parámetros. Se presenta aquí el método empírico que se utilizará para medir la sensibilidad a las probabilidades. Se propone también un método para medir la sensibilidad a la imprecisión en los umbrales.

A continuación, se modelan las fdp de los síntomas dadas las causas como funciones beta. Para ello se calculan los parámetros de las funciones beta utilizando un estimador de máxima verosimilitud de los casos reales obtenidos de una red GSM/GPRS. Mediante técnicas estadísticas se evalúa la proximidad entre los datos de la red y las fdp estimadas.

El siguiente paso consiste en la descripción de la metodología seguida para evaluar y comparar los modelos y técnicas propuestos en esta tesis. Una vez definida la metodología, se evalúan los diversos sistemas de diagnosis presentados en el Capítulo 5. Los experimentos se realizan tanto para casos de una red GSM/GPRS real como para casos simulados. Los aspectos analizados para todos los sistemas de diagnosis son los factores de mérito, la influencia en los resultados del número de casos de entrenamiento y la sensibilidad de sus resultados a imprecisiones en los parámetros. Además, para determinados métodos, como los algoritmos de discretización, se presentan ejemplos que ilustren su funcionamiento.

Finalmente, se resumen algunos resultados obtenidos a raíz de la colaboración con fabricantes y operadores de comunicaciones móviles. En primer lugar se presenta un prototipo de herramienta para la adquisición del conocimiento basada en los procedimientos descritos en el Capítulo 5. A continuación, se introduce un prototipo de herramienta automática de diagnosis. Finalmente, se describen resultados obtenidos al aplicar dicha herramienta de diagnosis en una campaña de pruebas en una red GSM/GPRS real.

En el Capítulo 7 se resume el trabajo realizado a lo largo de la tesis, se describen las principales dificultades encontradas y se proponen líneas de continuación.

## 1.4 Conclusiones

En esta tesis se ha diseñado un sistema para la diagnosis automática de fallos en redes de comunicaciones móviles. Las técnicas propuestas contribuyen a reducir los gastos operacionales (OPEX) en el escenario actual de redes cada vez más complejas. El sistema se ha probado en redes reales, mostrando excelentes resultados. Es de destacar el carácter multidisciplinar de la tesis, que combina conocimientos de inteligencia artificial y comunicaciones móviles.

Aparte de las contribuciones teóricas, la importancia de esta tesis radica en el acercamiento conseguido entre dos mundos tradicionalmente separados, como son la investigación teórica y la gestión operacional de red. Se trata de una investigación pionera en su campo, constituyendo la falta de estudios previos una de las dificultades iniciales que hubo que abordar. Tradicionalmente la comunidad universitaria ha ignorado los temas de operación de red, a pesar de que para los operadores de comunicaciones móviles constituye una de sus principales preocupaciones. Para llevar a cabo la tesis ha sido necesario entablar una estrecha relación con fabricantes y operadores, de forma que el sistema resultante fuese de aplicación directa en redes presentes y futuras. La relevancia de la investigación queda patente por el interés e implicación mostrados por operadores como Telefónica y France Telecom, o fabricantes, como Nokia. Además, en base a las investigaciones de esta tesis, una empresa danesa, Wirtek, ha desarrollado una herramienta comercial para la diagnosis automática.

## 2 Originalidad

La originalidad de esta tesis queda patente por el hecho de que no existían estudios previos sobre diagnosis automática en redes de acceso inalámbricas. Esta tesis empezó a desarrollarse a principios del 2001, cuando los conceptos de redes auto-gestionadas no estaban tan en boga como hoy día y cuando la investigación en temas de operación de red era prácticamente inexistente. Como prueba se ha hecho una búsqueda con scholar.google utilizando los términos [troubleshooting “mobile communication” diagnosis]. Como resultado se ha obtenido que, de las 10 primeras referencias, 7 son trabajos publicados por la autora de esta tesis. De las 3 referencias restantes, 2 hacen referencia a artículos de la autora de esta tesis, mientras que la referencia restante es una patente que no tiene que ver con el tema de la tesis.

### 2.1 Estado del arte

Los estudios previos a esta tesis sobre gestión automática de fallos en redes de comunicaciones móviles se centraban en métodos para conseguir una visualización eficiente del funcionamiento de la red y en métodos para la detección automática de fallos (primer paso de la gestión de fallos). Sin embargo, no existían referencia sobre diagnosis en la RAN.

La diagnosis automática había sido estudiada en otros campos de aplicación, como el diagnóstico de enfermedades en medicina, la gestión de fallos en impresoras y la diagnosis en el núcleo de redes de comunicaciones. No obstante, la diagnosis en la RAN de redes celulares tiene características distintivas, como la naturaleza continua de los indicadores de funcionamiento, la existencia de fallos de configuración (es decir, no relacionados con un equipo concreto), los cambios constantes en la red (nuevos equipos y cambios en la configuración de la red) y en el entorno (nuevos edificios, desaparición de obstáculos, etc.), la naturaleza aleatoria de la propagación radio, la falta de casos de test y de entrenamiento, etc. Todas estas peculiaridades hacen que las técnicas automáticas de diagnosis usadas en otros campos no sean directamente aplicable a la RAN de sistemas inalámbricos.

En las redes actuales, la diagnosis de fallos sigue siendo un proceso manual. Las investigaciones sobre automatización de la diagnosis en la RAN han estado tradicionalmente centradas en el estudio de métodos de correlación de alarmas. La correlación de alarmas consiste en la interpretación conceptual de múltiples alarmas, de forma que se conviertan en un número más reducido de alarmas más significativas. Aunque se pueda considerar la correlación de alarmas como un primer paso en la diagnosis de fallos, normalmente no proporciona información concluyente para identificar la causa de los problemas. Otros tipos de fallos, como fallos de configuración o interferencia, son muy difíciles de identificar si no se tienen en cuenta los KPIs, sino sólo las alarmas. Por estos motivos, esta tesis se centra en la diagnosis automática basada en indicadores de funcionamiento.

### 2.2 Contribuciones

Las contribuciones de esta tesis se pueden agrupar en cuatro subconjuntos. Un primer grupo consiste en la utilización de técnicas previamente existentes en un nuevo dominio de aplicación y en recopilar información conocida por expertos en diagnosis, pero no reflejada en la bibliografía existente:

- Se han aplicado a la diagnosis de fallos en la RAN de redes celulares múltiples técnicas de inteligencia artificial (Clasificador Bayesiano, Redes Bayesianas, métodos de discretización, algoritmos para calcular probabilidades, etc.). Estas técnicas se usaron previamente para

la diagnosis automática en otras aplicaciones y para la discretización o cálculo de probabilidades en el área de aprendizaje de máquinas. Sin embargo, esta es la primera vez que se han propuesto soluciones para la diagnosis automática en la RAN de redes de comunicaciones móviles.

El segundo conjunto de contribuciones consiste en la definición de un sistema para la gestión automática de fallos en redes de comunicaciones móviles:

- Se ha propuesto la arquitectura de un sistema automático de diagnosis para la RAN de sistemas de comunicaciones móviles, es decir, los principales elementos e interfaces que debería incluir el sistema de diagnosis y el escenario donde se localizaría.
- Se ha definido una base de conocimiento para GERAN, es decir, se han identificado las principales causas de un excesivo número de llamadas caídas en dichas redes, sus síntomas y sus parámetros relacionados.

El tercer conjunto de contribuciones comprende modelos y métodos para la diagnosis automática. Esos modelos y métodos no son sólo válidos para redes actuales (es decir, 2G y 2.5G), sino que pueden usarse también para otras redes celulares, como 3G o redes heterogéneas. La mayor parte de las técnicas puede incluso utilizarse para otras aplicaciones distintas a las comunicaciones móviles. En particular, las principales contribuciones son:

- Se ha propuesto una aproximación para las fdp condicionales de los síntomas dadas las causas como funciones beta.
- Se ha definido una estructura de BN llamada Modelo Central de Bayes. Esta estructura permite una representación más fiel de las relaciones causales del modelo de diagnosis que el modelo simple de bayes.
- Se ha propuesto un método novedoso de discretización, SEMD, basado en la minimización de la entropía. Se ha probado que el método SEMD consigue mayor porcentaje de acierto que otro método de discretización llamado EMD. Además, la complejidad de SEMD es menor que la de EMD.
- Se ha propuesto un método de discretización, BMAP, que se basa en el test de hipótesis. BMAP puede ser usado incluso cuando no se dispone de casos de entrenamiento, si los expertos definen los parámetros  $a$  y  $b$  de las funciones beta.
- Se ha propuesto un método, BDF, para determinar las probabilidades de una BN, que se basa en distribuciones beta. Al igual que la discretización BMAP, BDF puede aplicarse cuando no se dispone de casos de entrenamiento.
- Se han propuesto dos técnicas, SBN y MUI, para mejorar el porcentaje de aciertos cuando hay imprecisión en los parámetros del modelo. Uno de los principales beneficios de ambas técnicas es que la adquisición del conocimiento y la inferencia tiene la misma complejidad que en BN convencionales.
- Se han propuesto procedimientos de adquisición del conocimiento específicos para la diagnosis en redes de comunicaciones móviles. El modelo resultante puede estar basado en un clasificador Bayesiano o en una BN.

Finalmente, la evaluación de las técnicas propuestas ha sido una de las tareas más complejas de esta tesis. Debido a la falta de bases de datos con casos clasificados, ha sido necesario diseñar algoritmos para simular ejemplos de diagnóstico. Además, se han definido métodos para evaluar y comparar los distintos sistemas de diagnóstico. En resumen, las principales contribuciones en estas áreas son:

- Se ha propuesto un algoritmo para simular casos, que se basa en modelar las probabilidades condicionales de los síntomas como fdp beta. Los casos simulados se pueden usar como conjuntos de entrenamiento o conjuntos de test.
- Se ha propuesto un método para evaluar empíricamente la sensibilidad del diagnóstico a imprecisiones en la discretización de los síntomas continuos.
- Se ha diseñado y evaluado un clasificador Bayesiano para la diagnosis en redes de comunicaciones móviles actuales.
- Se han usado distintas estructuras de BN para implementar un sistema de diagnosis para GERAN, y se han evaluado y comparado. Además, se han evaluado los métodos propuestos (SBN y MUI) para disminuir los efectos de las imprecisiones en los parámetros de la BN.
- Se han evaluado y comparado diferentes técnicas para estimar las probabilidades de las BNs y para discretizar los síntomas continuos.
- Se han llevado a cabo pruebas en redes GSM/GPRS reales. Se ha demostrado que la herramienta de TS diagnostica la causa de fallo más rápido que un experto humano con un porcentaje de acierto similar o mayor. Los resultados obtenidos, en relación al tiempo necesario para proporcionar un diagnóstico, el porcentaje de aciertos y la manejabilidad de la herramienta, han confirmado la viabilidad de los sistemas de diagnosis basados en sistemas bayesianos y su capacidad para reducir los costes operacionales.



## 3 Resultados

### 3.1 Indicadores de calidad

- Mención de Doctorado Europeo
- Publicaciones:
  - 12 publicaciones en revistas internacionales (8 sobre la tesis y 4 sobre temas afines)
  - 2 capítulos de libros de difusión internacional
  - 11 publicaciones en congresos internacionales (6 sobre la tesis y 5 sobre temas afines) y 5 publicaciones en congresos nacionales
- Proyectos: Participación en 3 proyectos internacionales (2 sobre la tesis y 1 en temas afines)
- Aplicabilidad: 1 herramienta comercial desarrollada a partir de las investigaciones de esta tesis
- En base a la experiencia adquirida:
  - Invitación de la Comisión Europea a actuar como experto (evaluador y revisor) para el 6º y el 7º Programa Marco
  - 2 ponencias invitadas en seminarios internacionales
- Formación:
  - Dirección de 6 Proyectos Fin de Carrera en temas afines a la tesis
  - Impartición de un módulo sobre “diagnóstico automática en redes de comunicaciones móviles” dentro del programa oficial de postgrado en telecomunicación de la Universidad de Málaga (Programa de Doctorado con Mención de Calidad)

### 3.2 Resultados técnicos

Los métodos propuestos en esta tesis se han evaluado en tres fases: con casos simulados, con casos de redes reales, con un prototipo instalado en una red real. Se ha mostrado la viabilidad del sistema propuesto y su eficiencia a la hora de reducir tiempo en la diagnosis de los problemas, contribuyendo de esta forma a disminuir los gastos operacionales.

Como ejemplo del ajuste de las fdp de los síntomas mediante funciones beta, la Fig.2(a) muestra la fdp de un síntoma relacionado con calidad dado que la causa fue falta de cobertura. La línea continua es el histograma normalizado calculado a partir de casos obtenidos de una red real. La línea discontinua es la aproximación mediante una función beta. El gráfico de probabilidad en la Fig.2(b) demuestra la exactitud del ajuste.

En cuanto a los métodos de aprendizaje de parámetros a partir de datos, el mayor porcentaje de acierto se ha obtenido para el método de discretización llamado SEMD y el algoritmo de cálculo de probabilidades llamado m-estimate.

En la Fig.3 se comparan distintas técnicas propuestas en esta tesis. Los resultados muestran que el clasificador bayesiano (BC) da muy buenos resultados cuando los parámetros son exactos. Se pueden obtener parámetros adecuados si se dispone de una gran base de datos de casos de entrenamiento. En la Fig.3, se muestra que para un conjunto de 5000 casos de entrenamiento,

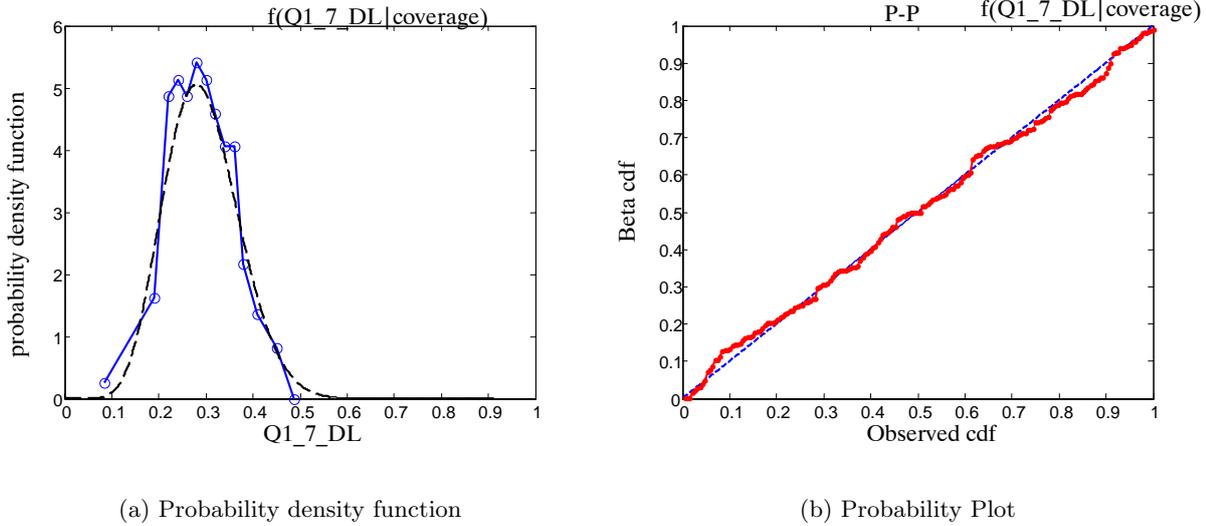


Figure 2: Modelado de una fdp para un síntoma relacionado con la calidad

la precisión obtenida con el clasificador bayesiano es mucho mayor que la obtenida con los otros sistemas de diagnóstico. Sin embargo, cuando los parámetros del modelo son inexactos, el funcionamiento del clasificador bayesiano se degrada. Los parámetros inexactos se pueden deber a la disponibilidad de un número reducido de casos de entrenamiento en el caso de modelos basados en datos, o a imprecisiones en la especificación dada por los expertos en modelos basados en el conocimiento. Por contra, se pueden obtener resultados razonables con redes bayesianas de mediano y pequeño tamaño. Se prefiere la estructura de Modelo Simple de Bayes (SBM) a la Noisy-OR porque el porcentaje de acierto es similar en ambas estructuras y el primero es mucho más fácil de implementar. En la Fig.3, se observa que para conjuntos de entrenamiento pequeños ( $N = 50$ ), el SBM funciona mejor que el BC. En contraposición, los resultados obtenidos con el SBM para conjuntos grandes de entrenamiento son mucho peores que los obtenidos con el BC. Los métodos propuestos para reducir la imprecisión, SBN y MUI, mejoran los resultados cuando hay cierto grado de imprecisión. En sistemas basados en datos, esto ocurre cuando el número de casos de entrenamiento es pequeño.

La Fig.4(a) muestra la dependencia del porcentaje de aciertos con el número de casos de entrenamiento. Se observa la abrupta pendiente del porcentaje de aciertos del BC cuando el tamaño del conjunto de entrenamiento se reduce. Por debajo de cierto número de casos de entrenamiento, el porcentaje de acierto del SBM es mayor que el del BC. Además, el comportamiento del SBM es más independiente del tamaño del conjunto de entrenamiento que el BC. Sin embargo, los resultados obtenidos con el SBM para conjuntos grandes de entrenamiento son mucho peores que los del BC.

El estudio de sensibilidad a imprecisiones en los parámetros del modelo se resume en la Fig.4(b). Se presenta el porcentaje de acierto en función de la desviación estándar de un ruido que se añade a los parámetros para simular su imprecisión. Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas con las BNs. La primera (BNs basadas en el conocimiento), en línea continua en la Fig.4(b), considera que los umbrales de discretización y las probabilidades han sido definidos por expertos. En cambio, la curva en línea punteada en la Fig.4(b) (BNs basadas en datos) analiza la sensibilidad del porcentaje de aciertos a parámetros imprecisos para sistemas basados en datos.

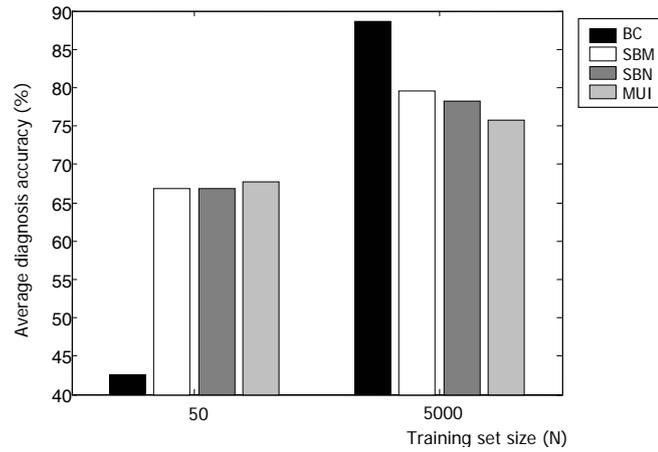
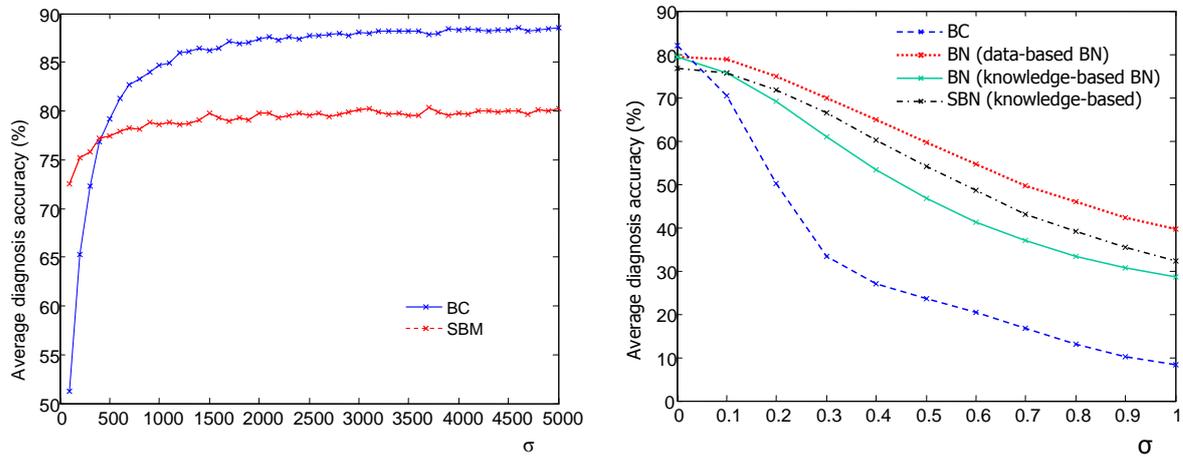


Figure 3: Comparación sistemas de diagnóstico

En las Fig.4(b) se muestra que el porcentaje de aciertos es menos sensible a imprecisiones en los parámetros en sistemas basados en datos que en sistemas basados en el conocimiento. Esto se debe a que en el primer caso las probabilidades se calculan en función de unos umbrales más exactos. En la Fig.4(b) se puede observar también que, en cualquier caso, las BNs son menos sensibles a los parámetros imprecisos que el BC. Las redes SBNs y MUIs mejoran el porcentaje de acierto obtenido con BNs basadas en el conocimiento cuando hay cierto grado de imprecisión en los parámetros. Por ejemplo, en la Fig.4(b) se observa la baja sensibilidad de un tipo de SBN en comparación con BNs basadas en el conocimiento.



(a) Dependencia con el tamaño del conjunto de entrenamiento

(b) Sensibilidad a imprecisiones en parámetros

Figure 4: Comparación de las técnicas propuestas



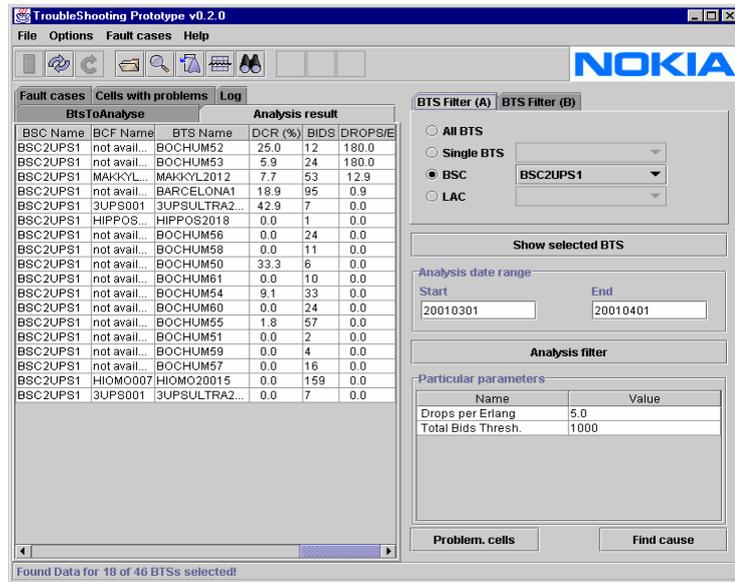


Figure 5: Prototipo de herramienta de diagnóstico desarrollada en colaboración con Nokia

## 4 Aplicabilidad

Esta tesis se ha llevado a cabo desde un principio en estrecha colaboración con fabricantes y operadores de red. Surgió en el marco de un acuerdo de colaboración con **Nokia**, y posteriormente se siguió desarrollando en colaboración con empresas como **Orange-France Telecom** y **Telefónica** dentro de proyectos internacionales. En todos estos proyectos la responsabilidad de la investigación sobre diagnóstico era de la autora de esta tesis. Las empresas implicadas llevaron a cabo tareas como el desarrollo de prototipos, definición de modelos para determinadas tecnologías (p.ej. UMTS) y pruebas en redes reales, siempre en cooperación con la autora de esta tesis.

Por tanto, la aplicabilidad de esta tesis es obvia si se tiene en cuenta que la temática surgió de una necesidad de operadores y fabricantes, que importantes empresas han tenido un alto grado de implicación en el proyecto y que se han realizado pruebas en redes reales. La memoria de la tesis incluye una breve descripción de dos prototipos desarrollados dentro de un acuerdo de cooperación con Nokia (p.ej. Fig.5), así como resultados de pruebas de campo en redes reales.

En el proyecto europeo Eureka-Celtic Gandalf, que en principio incluía una parte mínima relacionada con la gestión de fallos, la importancia de este tema fue creciendo durante el desarrollo del proyecto, hasta convertirse en la tercera parte del proyecto. La autora de esta tesis fue la responsable de las tareas de investigación, France Telecom desarrolló pruebas con un simulador, la empresa danesa Moltsen Intelligent Software realizó dos prototipos en base a las investigaciones (Fig.6) y, finalmente, Telefónica utilizó el prototipo para llevar a cabo pruebas en redes reales. La calidad del proyecto queda patente en el hecho de que recientemente la oficina Celtic ha concedido un premio a la excelencia al proyecto Gandalf, al ser uno de los mejores proyectos Celtic.

En base a los resultados obtenidos, la empresa Moltsen Intelligent Software desarrolló una herramienta para la gestión automática de fallos. Esta pequeña empresa fue adquirida por la empresa Wirtek gracias al potencial de la herramienta de gestión de fallos. En la actualidad dicha herramienta se encuentra en fase de comercialización por la empresa Wirtek (ver Anexo D).

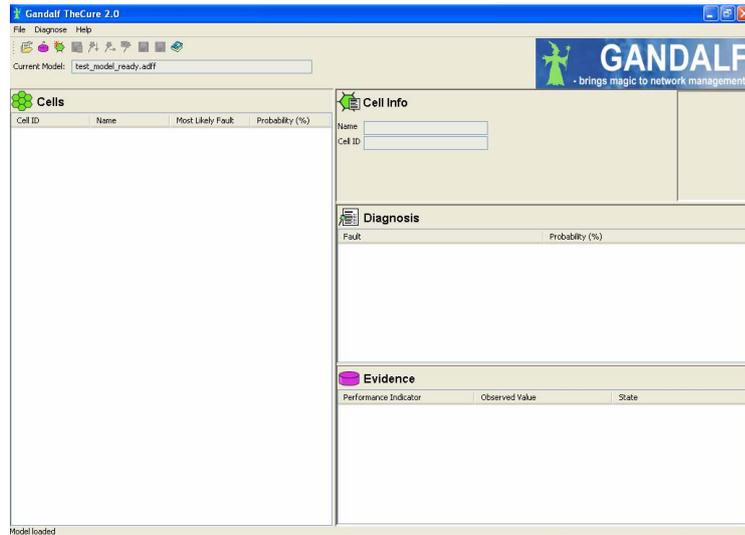


Figure 6: Herramienta de diagnóstico desarrollada en en el proyecto Gandalf

Los métodos propuestos en esta tesis no sólo son aplicables a redes de comunicaciones móviles. Prueba de ello es que, a raíz de la experiencia adquirida en el tema, la empresa Wirtek contrató a la Universidad de Málaga (en particular a la autora de esta tesis) para llevar a cabo un proyecto con la Agencia Espacial Europea (ESA) para desarrollar un sistema de gestión automática de fallos en redes de estaciones terrenas de satélites ([www.atsig-project.org](http://www.atsig-project.org)).

Uno de los requisitos de partida para todos los métodos que se han propuesto fue que pudiesen ser aplicados de forma inmediata en redes reales. A lo largo del desarrollo de la tesis se descartaron numerosos métodos debido a su elevada complejidad, que hacían poco viable su despliegue en redes reales, a favor de métodos más prácticos.

Los sistemas propuestos en esta tesis mejoran la eficiencia operacional de las redes de comunicaciones móviles presentes y futuras, gracias a los siguientes beneficios:

- La gestión automática de fallos reduce el tiempo requerido para identificar la causa de fallos en celdas con problemas. Esto implica que se mejora el funcionamiento de la red al reducir en gran medida el tiempo con baja calidad de servicio. Como consecuencia, el número de usuarios insatisfechos disminuye y se contrarresta la competencia de otros operadores de red y de otras tecnologías emergentes.
- Gracias a la automatización de los procedimientos de gestión de fallos, los costes operacionales se reducen porque se requiere menos personal con menos especialización. Esto se debe a que la mayoría de los problemas se pueden resolver con la ayuda de la herramienta automática de gestión de fallos. El personal más especializado queda entonces liberado de tareas rutinarias y puede dedicarse a otras tareas avanzadas de optimización de red, aumentando de esta forma la eficiencia operacional.
- Una de las principales dificultades de esta tesis fue la falta de documentación existente sobre gestión de fallos en redes de comunicaciones móviles. El procedimiento seguido para identificar la causa de fallos normalmente sólo es conocido por unos pocos expertos, que adquirieron su conocimiento después de muchos años de experiencia. Por tanto, una ventaja adicional de los métodos propuestos en esta tesis es que el conocimiento sobre

gestión de fallos queda almacenado en el modelo, haciendo, por tanto, a la empresa menos vulnerable a fluctuaciones de personal.



## **A Anexo: Proyectos relacionados**

En todos los proyectos siguientes la autora de esta tesis ha sido la responsable de las tareas de investigación relacionadas con la gestión automática de fallos.

### **Proyectos Nacionales**

- [P1] “Desarrollo de herramientas de optimización de los recursos radio en redes de comunicaciones móviles” (TIC2003-07827). Plan Nacional I+D. Nov.2003 - Nov.2006.
- [P2] “Gandalf” (FIT 330210-2005-42). PROFIT (Programa de fomento de la investigación técnica). Ene.2005 - Dic.2005.

### **Proyectos internacionales**

- [P3] “Colaboración para la puesta en marcha de un centro de ingeniería de sistemas de comunicaciones móviles en el centro de la Universidad de Málaga en el Parque Tecnológico de Andalucía (PTA)”. Entidad financiadora: Nokia Networks. Jul.2000 - Jul.2003.
- [P4] “Gandalf: Monitoring and self-tuning of RRM parameters in a multisystem network” (CELTIC CP2-014). Eureka Celtic. May.2005 - May.2007. [www.celtic-gandalf.org](http://www.celtic-gandalf.org). Este proyecto ha sido galardonado con el Premio a la Excelencia de la oficina Celtic.

### **Proyectos internacionales relacionados**

- [P5] “ATSIG: Automated Troubleshooting of Satellite Communication Ground Equipment” (Ref. 8.06/5.59.2805). Entidad financiadora: Wirtek / Agencia Espacial Europea. Feb.2007 - May.2007. [www.atsig-project.org](http://www.atsig-project.org)



## B Anexo: Publicaciones

### Artículos sobre la tesis en revistas

- [A1] R. Barco, P. Lázaro, L. Díez, and V. Wille. Continuous versus discrete model in auto-diagnosis systems for wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. In press.
- [A2] R. Barco, L. Díez, and V. Wille, and P. Lázaro, Automatic diagnosis of mobile communication networks under imprecise parameters. *Expert systems with Applications*. In press.
- [A3] R. Khanafer, B. Solana, J. Triola, R. Barco, L. Nielsen, Z. Altman, and P. Lázaro. Automated Diagnosis for UMTS Networks Using Bayesian Network Approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. In press.
- [A4] R. Barco, V. Wille, L. Díez, and M.Toril. Learning of model parameters for fault diagnosis in wireless networks. *Wireless Networks*. Accepted with revision.
- [A5] R. Barco, V. Wille, and L. Díez. System for automated diagnosis in cellular networks based on performance indicators. *European Trans. Telecommunications*, 16(5):399-409, October 2005.
- [A6] R.Barco, and M.Partanen. Automated troubleshooting in mobile networks. *Next Generation Telecommunications*, Issue 3, Cornhill Publications, KPMG Consulting, p.68-69, 2002.

### Artículos sobre la tesis en Lecture Notes

- [A7] R. Barco, P. Lázaro, V. Wille, and L. Díez. Knowledge acquisition for diagnosis in cellular networks based on bayesian networks. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 4092, 2006.
- [A8] R. Barco, P. Lázaro, L. Díez, and V. Wille. Multiple intervals versus smoothing of boundaries in the discretization of performance indicators used for diagnosis in cellular networks. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, 3483(IV):958-967, 2005.

### Artículos sobre temas afines a la tesis en revistas

- [B1] M. Toril, V. Wille, and R. Barco. Identification of missing neighbor cells in GERAN. *Wireless networks*. In press.
- [B2] L. Moltsen, R. Barco, P. Lázaro, S. Munagala. VSAT Network troubleshooting - Capturing knowledge and using it. *Quantum*. p.10-15, Aug.2007.
- [B3] M. Toril, V. Wille and R. Barco. Optimization of the assignment of cells to packet control units in GERAN. *IEEE Communications Letters*. Vol.10(3): 219-221, 2006.
- [B4] V. Wille, M. Toril and R. Barco. Impact of antenna downtilting on network performance in GERAN systems. *IEEE Communications Letters*. Vol.9(7): 598-600, 2006.

## Capítulos de libro

- [L1] V. Wille, S. Patel, R. Barco, A. Kuurne, S. Pedraza, M. Toril, and M. Partanen. Automation and optimisation. In T. Halonen, J. Romero, and J. Melero, editors, GSM, GPRS and EDGE performance: Evolution towards 3G/UMTS, pages 467-511. Wiley, Chichester, England, 2003.
- [L2] R. Barco, and P.Lázaro. Automated fault management in wireless networks. In I. Lee, editor, Handbook of Research on Telecommunications Planning and Management for Business. IGI Global. In press.

## Artículos sobre la tesis en congresos

- [C1] R. Khanafer, L. Moltsen, H. Dubreil, Z. Altman, and R. Barco. A bayesian approach for automated troubleshooting for UMTS networks. In Proc. 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06), Karlsruhe, Germany, August 2006.
- [C2] R. Barco, V. Wille, L. Díez, and P. Lázaro. Comparison of probabilistic models used for diagnosis in cellular networks. In Proc. IEEE Vehicular Technology Conference VTC'06, Melbourne, Australia, May 2006.
- [C3] Z. Altman, R. Skehill, R. Barco, L. Moltsen, R. Brennan, A. Samhat, R. Khanafer, H. Dubreil, M. Barry, and B. Solana. The Celtic Gandalf framework. In Proc. IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference MELECON'06, p.595-598, Benalmádena, Spain, May 2006.
- [C4] P. Stuckmann, Z. Altman, H. Dubreil, A. Ortega, R. Barco, M. Toril, M. Fernandez, M. Barry, S. McGrath, G. Blyth, P. Saidha, and L. Nielsen. The EUREKA Gandalf project: monitoring and self-tuning techniques for heterogeneous radio access networks. In Proc. IEEE Vehicular Technology Conference VTC'05, volume 4, pages 2570-2574, Stockholm, Sweden, June 2005.
- [C5] R. Barco, L. Nielsen, R. Guerrero, G. Hylander, and S. Patel. Automated troubleshooting of a mobile communication network using bayesian networks. In Proc. IEEE International Workshop on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN'02), p.606-610, Stockholm, Sweden, Sept.2002.
- [C6] R. Barco, R. Guerrero, G. Hylander, L. Nielsen, M. Partanen, and S. Patel. Automated troubleshooting of mobile networks using bayesian networks. In Proc. IASTED International Conference on Communication Systems and Networks (CSN'02), p.105-110, Málaga, Spain, Sept.2002.
- [C7] R. Barco, L. Díez, V. Wille, and P. Lázaro. Estructuras para la gestión automática de fallos en redes de acceso de sistemas celulares. In Actas del XXII Symposium Nacional de la URSI, Tenerife, Spain, September 2007.
- [C8] J. Rodríguez, R. Barco, and P.Lázaro. Comparación de sistemas para diagnosis automática en redes de comunicaciones móviles. In Actas del XXII Symposium Nacional de la URSI, Tenerife, Spain, September 2007.
- [C9] J. Fernández, R. Barco, and M. Fernández. Modelo de diagnosis automático para redes UMTS. In Actas del XXII Symposium Nacional de la URSI, Tenerife, Spain, September 2007.

- [C10] J. A. Fernández, R. Barco, and P. Lázaro. Sistema de ayuda al diseño de modelos de diagnosis para redes de comunicaciones móviles. In Actas del XX Symposium Nacional de la URSI, Gandía, Spain, September 2005.

### **Artículos sobre temas afines a la tesis en congresos**

- [D1] S. Munagala, L. Moltsen, R. Barco, and P. Lázaro. Automated troubleshooting of satellite communication ground equipment. In Proc. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, Mar.2008.
- [D2] P. Lázaro, R. Barco, and J.M. Hermoso. Diagnosis of earth stations using bayesian networks. In Proc. IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, p.268-272, Málaga, Spain, September 2002.
- [D3] V. Wille, A. Kuurne, S. Burden, and R. Barco. Simulations and trial results for mobile measurement based frequency planning in GERAN networks. In Proc. IEEE Vehicular Technology Conference VTC'02, p.625-628, Vancouver, Canada, September 2002.
- [D4] R. Barco, F. J. Cañete, L. Díez, and V. Wille. Analysis of mobile measurement-based matrices in GSM networks. In Proc. IEEE Vehicular Technology Conference VTC'01, p.1412-1416, Atlantic City, USA, Oct.2001.
- [D5] R. Barco and R. Segura. Automated test and diagnosis tools for satellite ground stations. In Proc. European Test and Telemetry Conference, p.5.34-43, Paris, France, Jun.1999.
- [D6] R. Barco, P. Lázaro, and J. M. Hermoso. Diagnosis de estaciones terrenas mediante redes bayesianas. In Actas del XVII Symposium Nacional de la URSI, p.225-226, Alcalá de Henares, Spain, September 2002.

### **Ponencias invitadas**

- [P1] R. Barco, S. Luna, M. Fernández. Optimisation and troubleshooting of heterogeneous mobile communication networks. In 3<sup>rd</sup> AROMA Workshop: Trends in radio resource management. Barcelona, Spain, Nov.2007.
- [P2] R. Barco. Automatic troubleshooting in heterogeneous mobile communication networks. In Gandalf Workshop: Automation of Radio Resource Management Tasks in Heterogeneous Radio Access Networks, France-Telecom, Paris, France, Apr.2007.

### **Informes técnicos**

- [D1] Simple Bayes model feasibility study. Technical Report ATS\_1H01\_BN, Nokia Networks, Jun.2001.
- [D2] Knowledge Acquisition Tool Specification. Technical Report ATS\_1H01\_KAT, Nokia Networks, Jun.2001.
- [D3] Conditions specification. Technical Report ATS\_2H02\_Cond, Nokia Networks, Apr.2002.
- [D4] Application of Causal Independence Models (CIM) to mobile networks. Technical Report ATS\_2H01\_CIM, Nokia Networks, Jan.2002.
- [D5] Practical considerations about modeling. Technical Report ATS\_1H02\_Model, Nokia Networks, Jan.2002.

- [D6] Modelling of continuous variables for a mobile network diagnosis tool. Technical Report ATS\_2H02\_cont, Nokia Networks, Dec.2002.
- [D7] D3.3. Refinement of the Gandalf architecture. Celtic-Gandalf project. Jun.2006.
- [D8] D5.3a. Automating Diagnosis in troubleshooting. Celtic-Gandalf project. Dec.2006.
- [D9] D7.2. Final report on Dissemination Activities. Celtic-Gandalf project. Mar.2007.

## C Anexo: Referencias al trabajo por parte de otros investigadores

- [R1] A. Chan, K. R. McNaught. Using Bayesian networks to improve fault diagnosis during manufacturing tests of mobile telephone infrastructure, *Journal of the Operational Research Society*, 2007.
- [R2] J.Lahio, A. Wacker, T.Novosad. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*, Wiley, 2nd Ed., 2006.
- [R3] D. Tikunov, T. Nishimura. Automated troubleshooting of mobile networks based on alarm and performance data using Bayesian networks. *IEEE Int. Conf. Software, Telecommunications and Computer Networks*, Sept. 2007.
- [R4] H. Langseth, Luigi Portinale. *Bayesian Networks in Reliability, Reliability Engineering & System Safety*, Volume 92, Issue 1, pp. 92-108, 2007.
- [R5] E. Millán, J. L. Pérez de la Cruz, F. García. *Dynamic versus Static Student Models Based on Bayesian Networks: An Empirical Study.*, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2774, pp. 1337-1344, 2003.
- [R6] A. Chan, K. R. McNaught. Using Bayesian networks to improve fault diagnosis during manufacturing tests of mobile telephone infrastructure, *European Conference on Intelligent Management Systems in Operations*, Manchester, UK, 2005.
- [R7] H. Dubreil. *Méthodes d'optimisation de contrôleurs de logique floue pour le paramétrage automatique des réseaux mobiles UMTS*, PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Telecommunications, Paris, France, 2005.  
([http://pastel.paristech.org/bib/archive/00001822/01/MemoireTheseDubreil\\_v2.1.pdf](http://pastel.paristech.org/bib/archive/00001822/01/MemoireTheseDubreil_v2.1.pdf))
- [R8] J. Laiho. *Radio network planning and optimisation for WCDMA*, PhD thesis, Helsinki University of Technology, Finland, 2002.  
(<http://lib.tkk.fi/Diss/2002/isbn9512259028/isbn9512259028.pdf>)
- [R9] T. Ekola. *Fault Management in Mobile Telecommunication Networks*, MSc Thesis, Tampere University of Technology, Finland.  
([https://ae.tut.fi/projects/diane/julkaisut/Ekola\\_Thesis.pdf](https://ae.tut.fi/projects/diane/julkaisut/Ekola_Thesis.pdf))
- [R10] P. Kraaijeveld. *GeNIeRate: An Interactive Generator of Diagnostic Bayesian Network Models*, MSc Thesis, University of Pittsburgh, USA, 2005.  
([http://www.kbs.twi.tudelft.nl/docs/MSc/2005/Kraaijeveld\\_Pieter/thesis.pdf](http://www.kbs.twi.tudelft.nl/docs/MSc/2005/Kraaijeveld_Pieter/thesis.pdf))
- [R11] A. M. J. Kuurne. *On GSM mobile measurement based interference matrix generation*, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Birmingham, USA, 2002.
- [R12] H. Langseth, Luigi Portinale. *Bayesian Networks in Reliability*, Technical Report TR-INF-2005-04-01-UNIPMN, The University of Piemonte Orientale, 2005.  
(<http://di.unipmn.it/Tecnical-R/Technical-3/TR-INF-200/TR-2005-04-01-UNIPMN.pdf>)
- [R13] B. Pasquereau, Y. Le Helloco, B. Breton. *Predicting Cellular Network Performances with Cell-Level Monte-Carlo Simulations*, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Dallas, USA, 2005.

- [R14] A. Trendowicz, T. Punter. Applying Bayesian Belief Networks for early software quality modelling, Technical Report IESE-Report No.117.03/E, Fraunhofer Institut, Alemania, 2003.  
(<http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0011-n-340417>)
- [R15] A. Samhat, R. Skehill, Z. Altman. Automated Troubleshooting in WLAN Networks. Mobile and Wireless Communications Summit. Budapest, Jul.2007
- [R16] Múltiples referencias al libro “GSM, GPRS and EDGE Performance”, tanto en revistas como en otros libros. Una búsqueda del libro con scholar.google devuelve 5780 enlaces y 61 citas.

## **D Anexo: Desarrollo comercial**

A continuación se muestra el folleto con que la empresa Wirtek está comercializando una herramienta automática de gestión de fallos. Esta herramienta ha surgido a partir de los proyectos internacionales descritos en el Anexo A, siendo la investigación correspondiente la presentada en esta tesis. Puede encontrarse más información en la siguiente dirección:

[www.wirtek.com/Main/Services%20and%20competencies/TheCure.aspx](http://www.wirtek.com/Main/Services%20and%20competencies/TheCure.aspx)

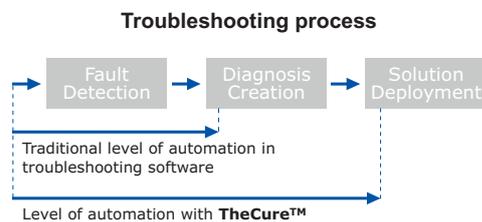


## Cut OPEX with automated troubleshooting

New 3G and IP-based wireless access technologies are continuously increasing the complexity of operator networks. The increase in complexity has a significant impact on the OPEX (Operational Expenditure). The Communication Service Providers experience extensive growth in terms of the cost of maintaining their networks – particularly in the area of troubleshooting.

Wirtek TheCure™ is a new automation product that will significantly decrease the resources needed for troubleshooting. Wirtek TheCure™ applies new, advanced technology from the field of artificial intelligence to determine the root cause of problems in the network. The ability to produce an accurate diagnosis is what distinguishes Wirtek TheCure™ from other troubleshooting solutions.

Traditionally, troubleshooting systems rely on human involvement in the diagnostic process. With Wirtek TheCure™ both the Fault Detection and Diagnosis Creation tasks are automated. By automating a substantial part of the troubleshooting process, operators will experience a 25-50% saving on resources.



**Wirtek TheCure™ significantly increases the automation level of the troubleshooting process**

**Wirtek TheCure™ speeds up the maintenance process**

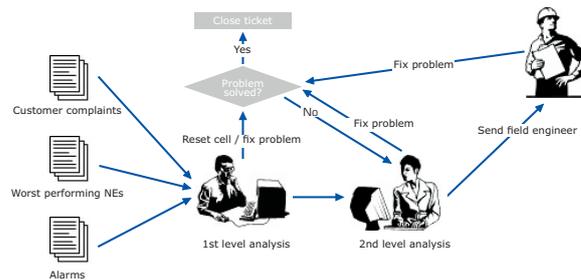


Figure 1 - Rich picture of the troubleshooting process



### **A must-have for operators of the future**

The operator using Wirtek TheCure™ will be in a strong position – not only selling traditional phone subscriptions to the consumer market, but also new network products and to completely new markets. The bandwidth capacity of networks will be purchased by MVNOs and MVNEs. New services and applications will be running on the basis on these networks.

In order to fulfill this role, the operator needs to define strong and mature processes for maintenance. Wirtek TheCure™ is the future-proof solution for supporting the operator troubleshooting process.

### **About Wirtek**

Wirtek is a software development house with core competencies within embedded software, applications, and infrastructure for mobile telecommunications. Strong competencies in software development and project leadership, thorough knowledge of the telecommunications sector, and a flexible business model that makes both insourcing and different forms of outsourcing possible, secure Wirtek core customer relationships based on a high level of trust and high customer satisfaction.

Wirtek was founded in 2001 by former Nokia employees with deep insight into the mobile world and its technologies. Among the clients are international companies such as Nokia, Motorola, End2End and Texas Instruments.



**Head Office**  
Wirtek a/s  
Nibevej 54  
DK-9200 Aalborg SV  
Denmark

Phone: +45 7214 6660  
Fax: +45 7214 6659

**Branch Office**  
Wirtek a/s  
Bregnerødvej 144  
DK-3460 Birkerød  
Denmark

Phone: +45 4594 9740  
Fax: +45 7214 6659

**Development Centre**  
SC Wirtek SRL  
Maestro Business Centre  
21st Dec. Boulevard, 104  
RO-400124 Cluj Napoca  
Romania

Fax: +40 3641 01608

**www.wirtek.com**

**E-mail: info@wirtek.com**