



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL EN COMPUTACIÓN**

**Modelos, Algoritmos y Herramientas para la  
Proyección de Redes WLAN/WiMAX**

**JORGE URZÚA CONTRERAS**

Profesor Guía: JAIME ÁLVAREZ

Memoria para optar al título de  
Ingeniero Civil en Computación

Curicó – Chile  
Marzo, 2008



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL EN COMPUTACIÓN**

**Modelos, Algoritmos y Herramientas para la  
Proyección de Redes WLAN/WiMAX**

**JORGE URZÚA CONTRERAS**

Profesor Guía: JAIME ÁLVAREZ

Profesor Informante: VÍCTOR SANTANDER

Profesor Informante: LUIS HUERTA

Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. Alexander Schill

Memoria para optar al título de  
Ingeniero Civil en Computación

Curicó – Chile  
Marzo, 2008

*Dedicado a las cinco personas más importantes que tengo.  
Mi hermana María Eugenia, mi hermano Ricardo, mis padres y Kristin.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que en forma directa o indirecta han hecho posible la realización de este proyecto.

Agradezco en forma especial al los profesores Federico Meza, Jaime Álvarez y Alexander Schill, quienes a parte de colaborar con su conocimiento, me han ayudado en todo este proceso.

A Kristin Lorenz, quién fue la verdadera motivación para el desarrollo de este proyecto.

A los profesores Andriy Luntovskyy y Dietbert Gütter, quienes me abrieron las puertas de la Universidad Tecnológica de Dresden y me permitieron participar de este proyecto.

A los profesores informantes Víctor Santander y Luis Huerta, por su voluntad de participar con sus conocimientos en este proyecto.

A la familia Lorenz, quienes me han apoyado en la integración a la cultura alemana.

A toda mi familia, quienes me han apoyado desde siempre.

A Patricio Urzúa, quién es una persona que me ha inspirado con su forma de ser.

A mis padres y hermanos, que han hecho y hacen todo por mí.

## TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Tabla de Contenidos	III
Índice de Figuras	VII
Índice de Tablas	IX
Aufgabenstellung	X
Resumen	XI
Abstract	XII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos de CANDY . . . . .	1
1.2. Objetivos del Proyecto de Memoria . . . . .	2
1.3. Objetivos específicos . . . . .	2
1.4. Alcances del Proyecto . . . . .	3
1.5. Este documento . . . . .	3
<b>2. Fundamentos de CANDY</b>	<b>5</b>
2.1. XML . . . . .	5
2.1.1. Elemento root . . . . .	7
2.1.2. Elementos . . . . .	7
2.1.3. Atributos . . . . .	7
2.1.4. <i>Unparsed Data</i> . . . . .	8
2.1.5. <i>Namespaces</i> . . . . .	8
2.1.6. Definiciones de Lenguajes . . . . .	8
2.1.7. Transformaciones . . . . .	9
2.2. SOAP . . . . .	9

2.2.1.	SOAP Syntaxis . . . . .	10
2.3.	<i>Viewpoint</i> . . . . .	11
2.4.	NDML . . . . .	11
2.4.1.	NDML 1.0 . . . . .	12
2.4.2.	NDML 1.1 . . . . .	12
2.4.3.	NDML 2.0 . . . . .	12
2.4.4.	NDML 3.0 . . . . .	13
2.5.	Arquitectura de CANDY . . . . .	13
<b>3.</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>15</b>
3.1.	Propagación de Ondas Electromagnéticas . . . . .	15
3.1.1.	Propagación en el Espacio Libre . . . . .	15
3.1.2.	Espectro Electromagnético . . . . .	16
3.1.3.	Reflexión . . . . .	16
3.1.4.	Difracción . . . . .	17
3.2.	Teoría de Antenas . . . . .	18
3.2.1.	Antenas Elementales . . . . .	19
3.2.2.	Antena Cilíndrica . . . . .	19
3.2.3.	Antenas Inteligentes . . . . .	20
3.2.4.	Parámetros básicos de una antena transmisora . . . . .	20
3.3.	Modelos para la Simulación de Redes . . . . .	21
3.3.1.	Modelos Empíricos . . . . .	22
3.3.2.	Modelos semi-empíricos . . . . .	22
3.3.3.	Modelos Basados en Óptica . . . . .	28
3.4.	Estándares de Redes Inalámbricas . . . . .	33
3.4.1.	Tecnología Wireless LAN . . . . .	34
3.4.2.	Tecnología WiMAX . . . . .	35
3.5.	Sistemas Basados en Bases de Conocimiento . . . . .	38
3.5.1.	Característica de Sistemas Expertos . . . . .	39
3.5.2.	Clasificación de Sistemas Expertos . . . . .	40
3.5.3.	Arquitectura de un Sistema Experto . . . . .	42
<b>4.</b>	<b>Metodologías</b>	<b>44</b>
4.1.	Metodología de Desarrollo de Software . . . . .	44

4.2.	Documentación de Software . . . . .	48
4.3.	Testing . . . . .	48
4.4.	Validación de Modelos de Propagación . . . . .	50
4.4.1.	Materiales . . . . .	50
4.4.2.	Implementación de Red Inalámbrica . . . . .	53
4.4.3.	Modelamiento de Escenario en CANDY . . . . .	54
4.4.4.	Medición de la Potencia de la Señal de un Router Wireless . . . . .	57
<b>5.</b>	<b>Elección del Algoritmo Óptimo</b>	<b>58</b>
5.1.	Fundamentos . . . . .	58
5.2.	Regresión Analítica . . . . .	59
5.2.1.	Relación entre Variables . . . . .	60
5.2.2.	Regresión Lineal Simple . . . . .	60
5.2.3.	Regresión Multiple . . . . .	61
5.2.4.	Cálculo de los Coeficientes de Regresión . . . . .	62
5.3.	Modelo de Elección del Algoritmo Óptimo . . . . .	63
5.3.1.	Requerimiento del Modelo . . . . .	63
5.4.	Experimento . . . . .	66
5.4.1.	Definición Variables Independientes . . . . .	66
5.4.2.	Definición de Hipótesis . . . . .	67
5.4.3.	Preparación del Experimento . . . . .	68
5.4.4.	Implementación del Experimento . . . . .	69
<b>6.</b>	<b>Arquitectura de Software</b>	<b>71</b>
6.1.	Tecnología Java . . . . .	71
6.1.1.	Origen de Java . . . . .	71
6.1.2.	Plataforma Java . . . . .	72
6.1.3.	<i>Java Virtual Machine</i> . . . . .	72
6.1.4.	<i>Java Application Programming Interface</i> (API) . . . . .	72
6.1.5.	Lenguaje de Programación Java . . . . .	73
6.1.6.	Framework de Implementación . . . . .	74
6.1.7.	Java 3D . . . . .	74
6.2.	Arquitectura de Software . . . . .	76
6.2.1.	Componentes del Software . . . . .	78

6.3. Implementación de Software . . . . .	83
6.3.1. Implementación de Modelo de Propagación . . . . .	83
6.3.2. Implementación del Modelo de Propagación Tridimensional . .	84
6.3.3. Implementación del Modelo de Elección del Algoritmo Óptimo	91
<b>7. Análisis de Resultados</b>	<b>94</b>
7.1. Análisis de Modelo para la Elección del Algoritmo Óptimo . . . . .	94
7.1.1. Cálculo de Coeficientes Regresores . . . . .	95
7.1.2. Test del Modelo Predictivo . . . . .	95
7.1.3. Resultado para cada Modelo . . . . .	97
7.2. Análisis de los Modelos de Propagación . . . . .	98
7.2.1. Medición de Escenario Experimental . . . . .	98
7.2.2. Simulación de Escenario Experimental . . . . .	99
7.2.3. Análisis de Resultados . . . . .	101
<b>8. Conclusiones</b>	<b>103</b>
<b>Glosario</b>	<b>105</b>
<b>Anexos</b>	
<b>A: Resultados Experimentales</b>	<b>112</b>
<b>B: Folletos Explicativos de CANDY</b>	<b>116</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
2.1. Jerarquía básica de Viewpoints. . . . .	11
2.2. Estructura de la información para NDML. . . . .	13
2.3. Arquitectura de CANDY. . . . .	14
3.1. Reflexión en superficies lisas. . . . .	17
3.2. Reflexión en superficies rugosas. . . . .	17
3.3. Representación geométrica del fenómeno de difracción en esquinas. . .	18
3.4. Atenuación de la señal según el modelo FSL [31]. . . . .	23
3.5. Definición de una ciudad para el modelo COST-Walfisch-Ikegami. . .	25
3.6. Geometría de Ray Tracing Model. . . . .	28
3.7. Representación geométrica del principio del modelo Ray Launching. .	29
3.8. Representación del camino dominante entre emisor y receptor. . . . .	31
3.9. Representación de árbol DPPM. . . . .	31
3.10. Representación del factor Waveguiding para un escenario urbanizado [18]. . . . .	33
3.11. Clasificación de redes inalámbricas según su alcance. . . . .	34
3.12. Familia del estándar IEEE 802.11 [10]. . . . .	35
3.13. Arquitectura de Sistema Experto. . . . .	43
4.1. Wireless Router modelo DI-524 D-Link [9]. . . . .	52
4.2. Wireless LAN usb 2.0 adapter utilizado como punto de acceso a la red generada por el router de la figura 4.1. . . . .	52
4.3. Instalación de Enrutador Wireless [9]. . . . .	54
4.4. Escenario para la simulación. El color plomo (negro) representa pare- des de concreto, rojo madera y el azul vidrio. . . . .	55
4.5. Configuración de proyecto para experimentación de la validación de software. . . . .	56
5.1. Table de colores para la representación de la potencia de la señal. . .	66
6.1. Plataforma Java 2, Standard Edition [23]. . . . .	73
6.2. Simbología para le representación de escenarios en Java 3D. . . . .	75

6.3.	Árbol del paquete javax.media.j3d de Java 3D [4]	77
6.4.	Representación de modelo MVC.	78
6.5.	Diagrama UML del paquete Model.	79
6.6.	Diagrama UML del paquete View.	81
6.7.	Interfaz gráfica de CANDY.	81
6.8.	Diagrama UML del paquete Controller.	82
6.9.	Arquitectura de CANDY 3D.	86
6.10.	Representación de escenario tridimensional por <i>EnvironmentComponent</i> .	87
6.11.	de una escena a través de los lentes de <i>NavigationComponent</i> .	88
6.12.	Gráfica de la geometría de <i>NavigationComponent</i> en tres dimensiones.	89
6.13.	Gráfica de la geometría de <i>NavigationComponent</i> en dos dimensiones.	90
6.14.	Sistema Experto para la elección del algoritmo óptimo.	91
6.15.	Representación gráfica del resultado de la función <i>ExpertSystem.explain()</i> .	93
7.1.	Relación entre $R^2$ y la correlación $Y - \hat{Y}$ .	98
7.2.	Medición de la señal con el software netStumbler.	100
7.3.	Simulación del Escenario Experimental.	102

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
3.1. Representación de Base de Conocimiento. . . . .	41
4.1. Tags reconocidos por Javadoc para la generación automática de la API [11]. . . . .	48
4.2. Formato de documentación de test de aceptación. . . . .	49
4.3. Formato de resultado de test de aceptación. . . . .	49
4.4. Formato de tabla para la captura de la atenuación para escenarios reales y simulados. . . . .	56
5.1. Formato de la tabla para la captura de resultados. . . . .	70
6.1. Descripción del paquete Model. . . . .	80
7.1. Observación del tiempo de ejecución para el algoritmo de simulación COST 231 WI. . . . .	96
7.2. Observación del tiempo de ejecución para el algoritmo de simulación COST 231 WI. . . . .	97
7.3. Formato de tabla para la captura de resultados. . . . .	99
7.4. Señal medida por medio del software NetStumbler para cada una de las celdas del escenario experimental. . . . .	99
7.5. Señal medida desde CANDY luego de la simulación con el algoritmo Multi Wall Modell. . . . .	101
A.1. Descripción de los escenarios aleatorios, donde $x_0$ = cantidad de edificaciones, $x_1$ = cantidad de user areas, $x_2$ = distancia promedio entre edificios y Base Stations, $x_3$ = distancia promedio entre edificios, $x_4$ = distancia promedio entre Base Stations y User Areas, $x_5$ = distancia promedio entre User Areas y $x_6$ = altura promedio de edificios.	113
A.2. Tiempo de Ejecución medido tras la simulación de cada escenario aleatorio con cada uno de los algoritmos implementados (milisegundos).	114
A.3. Exactitud del resultado en relación al algoritmo de <i>DPP level 5</i> medido tras la simulación de cada escenario aleatorio con cada uno de los algoritmos implementados. . . . .	115