



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**SISTEMAS INTELIGENTES DE
TRANSPORTE: CONTEO E
IDENTIFICACIÓN DE PASAJEROS
MEDIANTE IDENTIFICACIÓN POR
RADIOFRECUENCIA**

DAN MOSHE LANDAU STERNFELD

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado
como parte de los requisitos para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
CHRISTIAN OBERLI

Santiago de Chile, Octubre 2008

© MMVIII, DAN MOSHE LANDAU STERNFELD



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

**SISTEMAS INTELIGENTES DE
TRANSPORTE: CONTEO E
IDENTIFICACIÓN DE PASAJEROS
MEDIANTE IDENTIFICACIÓN POR
RADIOFRECUENCIA**

DAN MOSHE LANDAU STERNFELD

Miembros del Comité:
CHRISTIAN OBERLI
MIGUEL TORRES
RICARDO GIESEN
DORIS SAEZ
DIEGO CELENTANO

Tesis presentada a la Dirección de Investigación y Postgrado
como parte de los requisitos para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Octubre 2008

© MMVIII, DAN MOSHE LANDAU STERNFELD

A mi familia y a Javiera

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los que me apoyaron en la realización de esta tesis. Algunos de ellos me dieron ánimos en momentos de flaqueza, otros aportaron con alguna idea ingeniosa y 81 personas participaron en una serie de experimentos que permitieron obtener los resultados que se presentan en esta tesis. A todos ellos mis más sinceros agradecimientos.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del Problema	1
1.2. Resumen del trabajo y los resultados obtenidos	3
1.3. Organización de la Tesis	5
2. INTRODUCCIÓN A RFID	7
2.1. Clasificación de tags	12
2.1.1. Clasificación por fuente de energía del tag	12
2.1.2. Clasificación por capacidades	12
2.1.3. Clasificación por frecuencia portadora	12
2.2. Acoplamiento Magnético vs Electromagnético	17
2.3. Normas RFID	19
2.4. Rango de lectura y escritura de tags RFID pasivos	20
2.5. Colisión y algoritmos anticolidión	20
2.5.1. Búsqueda Binaria (<i>Binary Search</i>)	21
2.5.2. Aloha Ranurado (<i>Slotted Aloha</i>)	22
2.6. Resumen comparativo RFID a diferentes frecuencias	24
2.6.1. RFID en la banda LF	25
2.6.2. RFID en la banda HF	26
2.6.3. RFID en la banda UHF	27
2.7. Tecnología RFID escogida: UHF EPC Gen 2	27
2.7.1. Lectores	29
2.7.2. Antenas para lectores	30
2.7.3. Tags	30
2.8. Compras Realizadas	31

2.8.1.	Lector, antenas y cables	31
2.8.2.	Tarjetas	31
3.	MATERIALES, MÉTODOS Y DISEÑO EXPERIMENTAL	32
3.1.	Materiales y equipamiento	33
3.2.	Calidad de las tarjetas adquiridas	34
3.3.	Efecto de la localización de las tarjetas en la tasa de lectura	34
3.3.1.	Tarjetas en el bolsillo	34
3.3.2.	Tarjetas en mano, bolsillo, y mochila	34
3.3.3.	Encuesta: lugares más populares para llevar la tarjeta	37
3.4.	Efectos de la localización de antenas en la tasa de lectura	38
3.5.	Valores de las variables controlables	40
3.6.	Descripción experimentos de identificación en portal	41
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES	44
4.1.	Resultados generales, conteo e identificación en portal	44
4.2.	Análisis por localización de la tarjeta	45
4.2.1.	Tarjetas en la mano (H)	45
4.2.2.	Tarjetas en la billetera, dentro de la mochila (WB)	46
4.2.3.	Tarjetas en el bolsillo trasero del pantalón (WP y LP)	46
4.3.	Número de antenas a usar	49
4.4.	Errores de lectura	50
4.5.	Simulación de resultados	51
5.	TRABAJO FUTURO Y CONCLUSIONES	56
5.1.	Revisión de los resultados y comentarios generales	56
5.2.	Temas de investigación futura	57
	BIBLIOGRAFIA	60
	ANEXO A. NORMAS RFID	65
A.1.	Normas en la banda LF	65
A.1.1.	EM4102	65
A.1.2.	Hitag	65
A.2.	Normas en la banda HF	65
A.2.1.	MicroID	65
A.2.2.	Proximity Cards - ISO 14443	66
A.2.3.	Vicinity Cards - ISO 15693	66

A.2.4.	Mifare	67
A.2.5.	Icode1 e Icode2	68
A.2.6.	Tag-It	68
A.3.	Normas en la banda UHF	68
A.3.1.	ISO 18000-4	68
A.3.2.	ISO 18000-6	68
A.3.3.	ISO18000-7	68
A.3.4.	EPC Gen 1	69
A.3.5.	EPC Gen 2	69
A.3.6.	Ucode	69
A.3.7.	Televía - Tag - Norma DSRC	70
A.4.	Rangos de lectura	71
ANEXO B.	RESUMEN ALTERNATIVAS	72
B.1.	Mifare + tag en la banda LF	72
B.2.	Mifare + ISO 15693	73
B.3.	Mifare + EPC Gen 2	73
ANEXO C.	EXTENSIÓN DE RANGO MIFARE	74
ANEXO D.	DISTRIBUCIÓN NORMAL Y BINOMIAL	80
ANEXO E.	VELOCIDAD DE LECTURA DEL EQUIPO SIRIT IN510	82
E.1.	Multiplexación de antenas	82
E.2.	Efecto del número de tags y $Q_{inicial}$	82
E.3.	Efecto conjunto de la multiplexación y valor de $Q_{inicial}$	83
E.4.	Cantidad de lecturas al pasar por un portal	83
ANEXO F.	DISEÑO DE PORTAL	85
ANEXO G.	EXPERIMENTOS DE PARADERO	87
G.1.	Tasa de lectura y detección en un paradero	87
G.2.	Llegadas y embarques en un paradero	87
G.3.	Conteo de pasajeros en un bus desde el paradero	88
ANEXO H.	DATOS EXPERIMENTALES TARJETA EN MANO (H)	90
ANEXO I.	DATOS EXPERIMENTALES TARJETA EN BILLETERA DENTRO DE LA MOCHILA (WB)	92

ANEXO J. DATOS EXPERIMENTALES EN BILLETERA DENTRO DEL BOLSILLO (WP)	94
ANEXO K. DATOS EXPERIMENTALES TARJETA SUELTA EN EL BOLSILLO (LP)	96
ANEXO L. MEMORIA DE CÁLCULO - DATOS POR TARJETA	98

INDICE DE FIGURAS

2.1	Comunicación RFID.	8
2.2	Señal ASK reflejada.	8
2.3	Varios tags. (Transantiago, 2008) (Trossen Robotics, 2008) (Costanera Norte, 2008) (AlienTechnology, 2008).	9
2.4	Tags de vidrio, implantables (Trossen Robotics, 2008).	10
2.5	Tags en trenes de EEUU	11
2.6	Funcionamiento de tags pasivos, semi-pasivos y activos	13
2.7	Tags en las bandas LF, HF y UHF	13
2.8	Frecuencias UHF disponibles en el mundo	16
2.9	Acoplamiento de campo cercano y campo lejano	17
2.10	Comparación de rango, acoplamiento magnético vs. electromagnético	18
2.11	Codificaciones NRZ y Manchester	22
2.12	Algoritmo de búsqueda binaria	23
2.13	Aloha ranurado	24
3.1	Maqueta de la puerta del bus. (a) Dimensiones puerta, (b) posibles posiciones de antenas.	33
3.2	Tarjetas duales usadas en el experimento.	33
3.3	Posición antenas.	35
3.4	Resultados encuesta realizada sobre formas de llevar la tarjeta bip.	38
3.5	Variación en altura de la antena y diferentes ángulos	39
3.6	Porcentaje de lectura, tarjeta en el bolsillo trasero derecho, variando altura y ángulo de la antena	39
3.7	Lecturas promedio por tag, tarjeta en el bolsillo trasero derecho, variando altura y ángulo de la antena	40
3.8	Maqueta de la puerta del bus. (a) Dimensiones puerta, (b) posición de las antenas.	42
3.9	Potencia mínima necesaria para lectura exitosa de tarjetas simples y simples	42
3.10	Mapa sala E-14	43
4.1	Histograma para un caso en particular	51
4.2	Generación de estadística de detección por pasajero	52

4.3	Simulación del conteo de un pasajero al pasar por el portal	53
5.1	Antena RuBee enterrada en el suelo, lee todos los tags que están sobre ella, independiente de los materiales (Wikipedia - RuBee)	58
C.1	Campo magnético H en una bobina de N vueltas, radio R, por la que circula una corriente I (Finkenzeller, 2003).	74
C.2	Campo magnético H en un arreglo de Helmholtz, con bobinas de N vueltas, radio R, por las que circula una corriente I.	79
D.1	Distribución normal y desv. standard - Niveles de significancia (Wikipedia - Normal distribution, 2008).	81
E.1	Lecturas por segundo por tag para 1 antena, diferentes $Q_{inicial}$ y diferente número de tags.	82
E.2	Lecturas por segundo por tag para diferentes $Q_{inicial}$ con 1, 2 y 3 antenas.	83
E.3	Segundos por antena para diferentes $Q_{inicial}$ con 2 y 3 antenas.	84
E.4	Cálculo de la apertura de la antena a 20cm de la antena	84
F.1	Portal completo	85
F.2	Piso portal	86
F.3	Techo portal	86
G.1	Experimento en sala emulando paradero, para evaluar desempeño	88
G.2	Modelo simple de campo radiado en UHF dentro de una sala	88
G.3	Localización de las antenas en conteo de pasajeros en bus desde paradero	89
G.4	Localización alternativa de las antenas en conteo de pasajeros en bus desde paradero	89

INDICE DE TABLAS

2.1	Clasificación de tags según EPC	14
2.2	Clasificación de radiofrecuencias	14
2.3	Tipos de antenas para tag	15
2.4	Comparación de RFID a distintas frecuencias	15
2.5	Lista de normas RFID, por frecuencia y energización	19
2.6	Ancho de banda RFID a 13.56 MHz y 125 kHz	21
3.1	Lecturas de tarjetas simples y duales, pantalón holgado y ajustado	35
3.2	Lecturas de tarjetas simples	36
3.3	Lecturas de tarjetas duales	37
4.1	Resultados tarjetas duales, una fila - Porcentaje de detection	44
4.2	Resultados tarjetas duales, dos filas - Porcentaje de detection	45
4.3	Resultados tarjetas simples, una fila - Porcentaje de detection	46
4.4	Resultados tarjetas simples, dos filas - Porcentaje de detection	47
4.5	Porcentaje de detección vs. distancia de la antena, (WP, LP y H)	48
4.6	Porcentaje de detección por género (WP, LP y H, una fila, antena derecha baja)	49
4.7	Porcentaje de detección vs. altura bolsillo (WP, LP y H, una fila, antenas bajas)	49
4.8	Incremento de desempeño al agregar antenas	50
4.9	Probabilidad acumulada para un caso en particular	54
H.1	Detección de pasadas por el portal, tarjetas duales en H	90
H.2	Detección de pasadas por el portal, tarjetas simples en H	91
H.3	Lecturas por pasada, tarjetas duales en H	91
H.4	Lecturas por pasada, tarjetas simples en H	91
I.1	Detección de pasadas por el portal, tarjetas duales en WB	92
I.2	Detección de pasadas por el portal, tarjetas simples en WB	93
I.3	Lecturas por pasada, tarjetas duales en WB	93
I.4	Lecturas por pasada, tarjetas simples en WB	93
J.1	Detección de pasadas por el portal, tarjetas duales en WP	94
J.2	Detección de pasadas por el portal, tarjetas simples en WP	95
J.3	Lecturas por pasada, tarjetas duales en WP	95

J.4	Lecturas por pasada, tarjetas simples en WP	95
K.1	Detección de pasadas por el portal, tarjetas duales en LP	96
K.2	Detección de pasadas por el portal, tarjetas simples en LP	97
K.3	Lecturas por pasada, tarjetas duales en LP	97
K.4	Lecturas por pasada, tarjetas simples en LP	97
L.1	Estadísticas por tag, WP, dos filas, tarjetas duales - Parte I	102
L.2	Estadísticas por tag, WP, dos filas, tarjetas duales - Parte II	103

RESUMEN

El conteo de pasajeros es una tarea importante para la planificación y operación de sistemas de transporte público modernos. No obstante, equipos de conteo tradicionales no son capaces de identificar pasajeros individuales. Disponer de esta capacidad adicional permitiría recolectar estadísticas históricas sobre los hábitos de cada pasajero, y así posibilitar una mayor optimización de estos sistemas. Este trabajo propone un método de conteo e identificación de pasajeros mediante tecnologías de Identificación por Radio Frecuencia (RFID). El desempeño de tarjetas UHF EPC Gen 2 es medido experimentalmente con tarjetas simples y duales —estas últimas contienen tanto un tag Mifare como un tag UHF EPC Gen2. Cuarenta personas participan en las mediciones llevando las tarjetas en mochila, billetera, bolsillo y mano, pasando por un portal de tamaño similar a la puerta de un bus. Se evalúan situaciones de una y dos filas de personas caminando a través del portal, equipado con 4 antenas lectoras. Se presentan extensas estadísticas de desempeño para todas las combinaciones de 1, 2, 3 y 4 antenas. El porcentaje de detección de pasajeros con dos antenas adecuadamente localizadas promedia 82% para tarjetas duales y 91% para tarjetas simples. Al usar cuatro antenas hay un aumento adicional de 2% para ambos tipos de tarjeta.

Palabras Claves: Identificación por Radiofrecuencia (RFID), EPC Gen 2, Conteo Automático de Pasajeros (APC), Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS).

ABSTRACT

Passenger counting is an important task for modern public transportation system's planning and operation. However, traditional counting systems can't identify individual passengers. The access to this additional capacity would allow collecting historical statistics on each passenger's transportation needs, hence enabling a substantially enhanced optimization in these systems. With this purpose, this work proposes a passenger counting and identification method through Radio Frequency Identification Technologies (RFID). Forty individuals are involved in measurements carrying EPC Gen 2 tags in their backpacks, wallets, pocket and hand, passing through a portal with a similar size as a bus door. Conditions of one and two rows of persons walking through the portal are evaluated. This portal is equipped with 4 reading antennas. Cards that have a single EPC Gen 2 tag and cards with both a Mifare and a UHF EPC Gen2 tag are used. Card reading statistics for all the combinations of 1, 2, 3 and 4 antennas are presented in this paper. The passenger detection percentage at the portal with two properly located antennas has an average of 82% for dual-band cards and 91% for single-band cards. When four antennas are used, there is an additional increase of 2% in the detection percentage for both types of cards.

Keywords: Radio Frequency Identification (RFID), EPC Gen 2, Automatic Passenger Counting (APC), Intelligent Transportation Systems (ITS).

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del Problema

Actualmente un medio de pago muy popular en los sistemas de transporte público son las “tarjetas inteligentes sin contacto de identificación por radio frecuencia” (*RFID contactless smart cards*). El uso de estas tarjetas inteligentes junto con un cuidadoso diseño de la red de transporte permitiría tarifas integradas y otorgaría al sistema de transporte información sobre los viajes realizados por la ciudad. La información recopilada se podría analizar para generar estadísticas sobre el comportamiento de los usuarios del sistema de transporte, otorgando así una herramienta para estudiar modificaciones y realizar un control de calidad del sistema evaluando los niveles de demanda y congestión en diversos puntos de la red.

El 10 de febrero de 2007 comenzó a funcionar en Santiago de Chile un nuevo sistema de transporte público llamado Transantiago. Dicho sistema integra al menos cuatro líneas de metro y distintas líneas de buses (troncales y alimentadores). El principal medio de pago¹ son las tarjetas bip! y multivía, tarjetas inteligentes sin contacto de identificación por radiofrecuencia de normas Mifare (ISO 14443-A) e ISO 14443-B, respectivamente.

Este nuevo plan de transporte para la ciudad de Santiago es un cambio profundo que para funcionar correctamente requiere del aprendizaje de usuarios, empresas operadoras y organismos fiscalizadores. Por un lado, el Metro de Santiago es anterior al plan y, como todo Metro, funciona en un ambiente controlado (vías exclusivas, sin interacción con otros medios de transporte) que convierte su gestión es un problema más estándar y por tanto más sencillo de enfrentar. En cambio, el caso del transporte en superficie usando buses troncales y alimentadores, no tiene precedentes en la ciudad. Principalmente por estos motivos Transantiago y su puesta en marcha no han estado exentos de polémicas y complicaciones.

Actualmente las tarjetas bip! y multivía funcionan usando la norma ISO 14443, tarjetas de proximidad (*proximity cards*), lo que les otorga un rango de lectura y escritura de unos 10 cm. Para pagar su pasaje, cada persona que aborda un bus debe acercar su tarjeta a un validador. El equipo validador mantiene una conversación encriptada con la tarjeta, decidiendo qué tarifa aplicar dependiendo del recorrido ya realizado por la persona y su

¹También se puede pagar con monedas pero sin vuelto en los buses alimentadores, esta forma de pago casi no se usa. En el metro se pueden comprar boletos. El problema de ambas modalidades es que se pierde la capacidad de transbordo por el mismo pago.

rango etéreo (estudiante, normal, 3^a edad). Luego el equipo validador registra en la tarjeta información relevante del viaje actual y actualiza el saldo.

En este marco nace el proyecto Conicyt Anillo ACT-32, con el objetivo general de investigar herramientas y estrategias de control de flota. Este proyecto está compuesto por dos grupos de trabajo. El primero de ellos busca generar un modelo para gestión de una flota de buses circulando por un corredor exclusivo, siendo su objetivo entregar un servicio de alta calidad: bajos tiempos de espera y viajes más rápidos. El modelo investigado requiere de una serie de datos de entrada en tiempo real: posición del bus (*Global Positioning System* - GPS o *Automatic Vehicle Location* - AVL), número de personas viajando en el bus y cantidad de personas esperando en paraderos. El modelo generado por este grupo de trabajo se evaluará mediante simulación y por ese motivo precisa de estadísticas exhaustivas de los datos de entrada. El segundo grupo de trabajo se enfoca en los problemas técnicos relacionados a entregar los datos de entrada necesarios: cantidad de gente en paraderos, hora de bajada, hora de subida y número de personas en el bus. Esos datos sirven al proceso de simulación del primer grupo de trabajo y dan sustento a todo el proyecto.

La presente tesis pertenece al segundo grupo de trabajo. Específicamente, se estudiará una técnica para obtener datos sobre la bajada de los pasajeros, horario de bajada y ID cada tarjeta bip portada por cada usuario. Para esto se debe leer el ID de la tarjeta y luego registrarlo junto con la hora de la lectura en algún medio de almacenamiento. Esta aplicación necesita leer solamente la información más básica contenida en la tarjeta, sin necesidad de actualizar la información contenida en ella. Por lo tanto, no es necesario conocer claves de acceso ni la estructura de datos usada en estas tarjetas. Así, para obtener la identificación simplemente se deberá energizar la tarjeta y solicitar que responda con su ID.

Lo más sencillo sería pedirle al usuario que antes de descender del bus acerque su tarjeta a un validador especial. Lamentablemente no se puede garantizar que todos los usuarios cumplan con esta sencilla tarea. Por lo tanto, se debe diseñar un sistema que sea capaz de leer la tarjeta sin participación activa del usuario. La idea de crear un portal de antenas lectoras de tarjetas Mifare para montar en la puerta de bajada, permitiendo registrar la bajada de pasajeros a través de los IDs de sus tarjetas es el punto de partida de esta tesis. Como se verá, este cambio en la forma de leer la tarjeta no es factible en la práctica.

1.2. Resumen del trabajo y los resultados obtenidos

La hipótesis de este trabajo es que la tecnología RFID puede servir al propósito de contar y detectar pasajeros bajando de un bus. Se estudian dos alternativas, una de ellas consiste lograr lecturas de vecindad (hasta 1,5 m) sin modificar la tarjeta bip actual (Mifare - ISO 14443-A), realizando cambios en el equipo lector y sus antenas para permitir un rango de lectura suficiente. La segunda alternativa consiste en utilizar tarjetas bip que contengan un tag adicional operando en otra norma, permitiendo mantener el protocolo Mifare pago y utilizar otro protocolo RFID para detectar pasajeros a la bajada del bus.

En concordancia con la hipótesis propuesta, el objetivo general de esta tesis consiste en estudiar técnicamente las diferentes posibilidades de modificación al actual sistema de tarjeta bip que permitan lograr identificar al pasajero a la bajada del bus. Además se desea realizar una experimentación que permita evaluar una de esas alternativas.

Con este fin, se deberán estudiar en detalle distintos estándares RFID que operan a distintas frecuencias. Luego se deberán delinear soluciones tomando en cuenta que el estándar escogido sea compatible con el actual sistema de pago. La solución más idónea será escogida para una experimentación que evalúe su desempeño. La experimentación se divide en dos etapas. En primer lugar se realizarán experimentos de laboratorio destinados a conocer la capacidad real del sistema: alcances de lectura, tasas de lectura, efecto de la localización del tag en su lectura y ubicación adecuada de antenas. Con estos experimentos se diseña la segunda etapa de experimentación, en la que se realiza un experimento masivo para evaluar la efectividad del sistema propuesto.

Los resultados que se esperan son índices de efectividad del sistema en distintas condiciones, comparables a las condiciones de operación reales. Además se desea obtener datos útiles para futuros trabajos, indicadores que permitan definir estrategias para mejorar el desempeño del sistema propuesto.

Existen sistemas comerciales de conteo de personas, basados en arreglos de sensores infrarrojos y procesamiento de imágenes. Los fabricantes de esos equipos sostienen que entregan desempeños superiores al 95% para conteo de personas en buses, trenes y edificios (Eurotech, 2008) (Infodev, 2008) (Acorel, 2008) (Iris, 2008) (DILAX, 2008). Además existen publicaciones científicas que proponen algoritmos conteo de personas basados en procesamiento de imágenes y sensores infrarrojos entregando desempeños similares a los equipos comerciales (Albiol, Mora, & Naranjo, 2001) (Chen, Chen, & Chen, 2006) (Crabtree, 2002) (Lee & Mase, 2001).

Ninguno de los sistemas mencionados es capaz de identificar individualmente a cada pasajero. Sin embargo, existe una vertiente en el campo de procesamiento de imágenes que eventualmente sería capaz de identificar. Ese enfoque está basado en detección de caras para contabilizar e identificar personas. En el proyecto ACT-32 hay un equipo investigando esta alternativa. Su trabajo se basa en algoritmos desarrollados en (Yang & Huang, 1994) (Yow & Cipolla, 1996) (Rowley, Baluja, & Kanade, 1996) (Viola & Jones, 2001) (Viola & Jones, 2003) (Lienhart & Maydt, 2002) (Sauquet, Marcel, & Rodriguez, 2005). En conteo de caras, los trabajos citados logran desempeños de hasta 95%, con 1 falso positivo en 16.000 casos exitosos y procesando las imágenes en tiempo real. Para identificar una persona, luego de la detección de una cara se debe procesar esa zona de la imagen y buscar la cara detectada en una base de datos con imágenes anteriores y/o características de imágenes anteriores.

Identificación es la razón de ser de las tecnologías RFID y las alternativas que pueden garantizar un 100% de lecturas utilizan tags activos (Werb & Lanzl, 1998). Los tags activos son caros y voluminosos, una alternativa más económica es la de utilizar tags semi-pasivos, que pueden ser muy similares a los pasivos presentando rendimientos y duraciones cercanos a los de tags activos. Los fabricantes de tags semi-pasivos prometen lecturas a unos 40 m (PowerID, 2008), permitiendo competir en desempeño con los tags activos. Los tags activos y semi-pasivos tienen una vida útil limitada por la duración de su batería, con una vida útil de 2-5 años. Los tags pasivos son aún más baratos y tienen mayor vida útil, existen algunos capaces de contabilizar personas pasando por un portal (IPICO, 2007). Lamentablemente ninguno de estos tags (activos, semi-pasivos o pasivos) permite la utilización del protocolo Mifare. Además cada uno de los sistemas nombrados en este párrafo es un desarrollo propietario poco masificado y por tanto su futuro incierto en la industria.

En sistemas públicos de transporte el medio de pago RFID más seguro hoy en día es Mifare. Sin embargo esa tecnología está limitada a un rango de lectura de 10 cm.

RFID funciona en diferentes bandas de frecuencia no licenciadas. Cada una de estas bandas de frecuencia presenta ventajas y desventajas sobre las demás. En la misma banda de Mifare existe la norma ISO 15693 con un rango de 1,5 m y buen comportamiento de las señales frente al cuerpo humano, el problema es que las capacidades de seguridad de esta norma son muy inferiores a Mifare. Debido a que ambas normas funcionan en la misma banda es impracticable el uso de una tarjeta dual Mifare + ISO 15693, en que Mifare es usada para pago e ISO 15693 para detección a mayor distancia. Otra norma con un rango del orden de 1 m es Hitag y opera en baja frecuencia (LF), el problema es que en esta

norma no existe capacidad de lectura de múltiples tags, por lo que el conteo masivo es impracticable.

La banda de frecuencia que falta explorar en el mundo de los tags RFID pasivos es la de frecuencia ultra alta (UHF). En esta banda existe la norma EPC Gen 2, permitiendo lecturas de hasta 7 m y con capacidad para manejar múltiples tags en el ambiente de lectura. Sin embargo, las señales en estas frecuencias sufren obstrucciones severas del cuerpo humano. La propuesta de esta tesis es una tarjeta dual Mifare + EPC Gen 2, en que cada una de las dos componentes es independiente, usándose Mifare para pago y EPC Gen 2 para conteo e identificación. El tema de las tarjetas duales es relativamente novedoso y existen algunos trabajos en el área; antenas para tags (Leong, Ng, & Cole, 2007), circuitos integrados para tags (Zhu, Jamali, & Cole, 2005) y lectores (Reynolds et al., 2006) capaces de operar en ambas bandas. Leong et al. (2007) diseñan una antena única sintonizada para operar en ambas bandas de frecuencia. Zhu et al. (2005) diseñan un circuito integrado capaz de operar en ambas bandas de frecuencia, por lo que combinado con la antena de Leong et al. (2007) generaría un tag dual integrado. Reynolds et al. (2006) diseñan un equipo lector RFID basado en procesamiento digital de señales (DSP) capaz de operar en ambas bandas de frecuencia. Hasta esta tesis no ha existido una publicación que experimente de manera intensiva el conteo y detección de personas utilizando tarjetas duales Mifare + EPC Gen 2. La referencia más cercana es (Mitsugi, 2005). En ese trabajo aparecen resultados de conteo de personas pasando por un portal utilizando tarjetas EPC Gen 2 colgadas al cuello. En esos experimentos participan solamente 3 personas por lo que los datos publicados no son estadísticamente significativos ni comparables con los de esta tesis.

Esta tesis propone una disposición de antenas en un portal de 2.1 m de alto por 1.15 m de ancho que permite obtener niveles de lectura comparables a los de equipos de conteo comerciales al utilizar tarjetas simples EPC Gen 2, con la ventaja adicional de identificar pasajeros. En el caso de tarjetas duales, Mifare + EPC Gen 2, algunas formas de llevar la tarjeta no alcanzan un nivel de detección suficiente para competir con los sistemas comerciales mencionados. Sin, embargo se delinean directrices para superar esta brecha.

Dado que el uso de tarjetas Mifare es altamente difundido en sistemas de transporte público, esta tesis y futuros trabajos en la misma línea pueden ser de gran interés para la industria.

1.3. Organización de la Tesis

El Capítulo 2 presenta una revisión de la tecnología RFID. Se introduce el funcionamiento de estos sistemas, diversas normas, rangos de lectura y aplicaciones. Además en este capítulo se justifica la elección de la norma UHF EPC Gen 2 y se entregan detalles sobre el equipo adquirido.

En el Capítulo 3 se diseñan los experimentos realizados. Comienza con una definición de las variables controlables (posición de las antenas, configuración de parámetros del lector, localizaciones de la tarjeta, cantidad de filas pasando por el lector y velocidad de pasada por el lector). Luego se realizan experimentos de laboratorio para identificar los valores que tendrán dichas variables en los experimentos a realizar. Finalmente se describen experimentos para verificar el porcentaje de éxito del sistema propuesto en conteo y detección de personas subiendo y bajando de un bus en diferentes condiciones de operación.

En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de la realización de los experimentos descritos en el Capítulo 3. Además se introduce un algoritmo para reproducir las estadísticas mediante simulación.

En el capítulo 5 se resumen y comentan los resultados más relevantes del experimento. Además se señalan posibilidades de futuras investigaciones en RFID, conducentes a mejorar los desempeños obtenidos o reducir costos de implementación.

2. INTRODUCCIÓN A RFID

La identificación automática que permite RFID tiene un amplio campo de aplicaciones. RFID se puede usar para marcar animales, como un medio de pago, para mejorar la eficiencia y control de una cadena de abastecimiento, para manejar una biblioteca (Collao, 2008), como mecanismo de control de acceso automatizado y muchas otras aplicaciones (Thomas, 2004).

RFID se basa en que existen dos dispositivos que desean comunicarse; generalmente lector es el dispositivo energizado mientras que el tag es el dispositivo pasivo. El tag será el que obtenga energía desde el lector. Para lograr eso el lector emite una portadora pura a una frecuencia dada, la antena del tag está sintonizada a esa misma frecuencia. El tag recibe esta señal de RF y la rectifica obteniendo un voltaje DC que le permite hacer funcionar su circuito integrado. Sin embargo, esta energía obtenida por el tag no es suficiente para energizar un transmisor que envíe la señal de respuesta al lector. Para ello, existen dos alternativas que permiten la respuesta del tag pasivo y dependen de la frecuencia utilizada. La descripción de estas alternativas es muy similar —el tag responde reflejando y modulando una portadora pura emitida por el lector (*backscattering*)— pero se basan en principios electromagnéticos diferentes.

En frecuencias de las bandas LF y HF se usa **Acoplamiento Magnético** (*Magnetic Coupling*). En estos sistemas la comunicación entre lector y tag, así como la energización de este último, se da por acoplamiento magnético. Esta operación es similar a la de un transformador, en el cual el tag sería una bobina y el lector la otra. Sin embargo, dada la separación entre ambas bobinas el proceso de transferencia energética es mucho menos eficiente que en un transformador estándar. Por ese motivo se requiere una emitir una cantidad de energía mucho mayor a la requerida en la bobina del tag para su energización. Para la comunicación entre tag y lector se utiliza la conexión y desconexión de una carga resistiva o inductiva, sintonizando y desintonizando la antena del tag produciendo la modulación de la señal reflejada (Finkenzeller, 2003).

En UHF se usa **Modulación de la Reflexión de Corte Transversal** (*Modulated Reflection Cross-Section*). Se sabe que las ondas electromagnéticas son reflejadas por objetos con dimensión mayor a media longitud de onda. La eficiencia de esta reflexión depende de la resonancia de la antena del tag, si la antena está sintonizada la resonancia es alta por lo que la reflexión también lo es. La capacidad de reflexión de una antena se puede ver

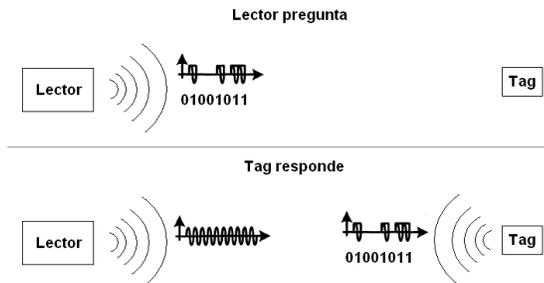


FIGURA 2.1. Comunicación RFID.

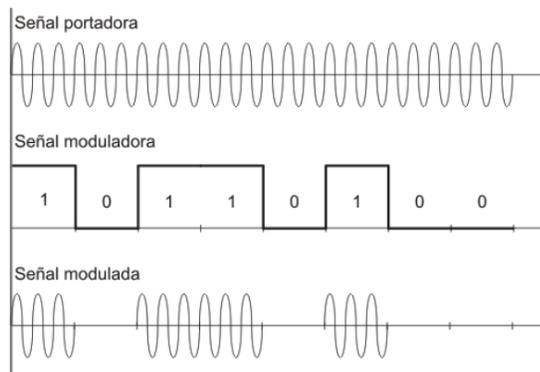


FIGURA 2.2. Señal ASK reflejada.

afectada por la conexión de una carga resistiva. Por lo tanto, al conectar y desconectar la carga se obtendrá una modulación de la señal reflejada (Finkenzeller, 2003).

Existen dos modalidades de comunicación en RFID pasivos. La primera de ellas se basa en que el **Lector Habla Primero** (*Reader Talks First - RTF*) y se puede dividir en tres pasos:

- (i) El lector envía una señal modulada, señalándole a los tags presentes que deben contestar
- (ii) El tag recibe la señal, obtiene energía de ella y comprueba si debe responder.
- (iii) El lector envía una portadora pura (señal sin modular), el tag se energiza y responde reflejando y modulando esta portadora.

La figura 2.1 muestra la situación descrita. En la figura 2.2 se muestra un ejemplo de modulación ASK de la señal reflejada por el tag.

En la segunda modalidad el **Tag Habla Primero** (*Tag Talks First - TTF*). En este caso el lector provee una portadora pura en todo momento, generando una zona de lectura en que la señal es suficiente para energizar uno o más tags. Si un tag entra en esta zona se energiza y comienza a responder inmediatamente. El tag debe ser configurado de antemano definiendo los requerimientos de la respuesta. Estos requerimientos fijan el intervalo promedio entre repeticiones de la respuesta y la dirección de memoria de los datos a transmitir.

Los elementos principales de un sistema RFID son los lectores y los tags. Existen lectores de variadas formas, potencias, número de antenas, antenas internas o externas. Algunos tienen un alcance de unos pocos centímetros, otros pueden alcanzar unos metros. Hay lectores que solamente leen el ID registrado en el tag y otros además son capaces de modificarlo y escribir datos adicionales en la memoria del tag. Las funcionalidades y capacidades dependen algunas veces del equipo utilizado y otras veces dependen del tipo de tag.

Existen múltiples formatos físicos para los tags: tarjetas, llaveros, ampollas de vidrio, televía, calcomanías, naipes, rígidos (para montaje en trenes, autos y camiones). La Figura 2.3 muestra algunos de ellos y en la Figura 2.4 aparecen tags implantables (*Transantiago, 2008*) (*Trossen Robotics, 2008*) (*Costanera norte, 2008*) (*AlienTechnology, 2008*). Cabe mencionar que la norma utilizada por cada tag no necesariamente guarda relación con su forma. Además de la forma, los tags pueden variar en norma, operando a diferentes frecuencias y usando diferentes formas de comunicación. Por ejemplo se puede tener una calcomanía que tenga exactamente la misma funcionalidad de la tarjeta bip. Pero la versión de la ampolla de vidrio expuesta en la imagen funciona con un protocolo y una frecuencia portadora diferente a la de la tarjeta bip.



FIGURA 2.3. Varios tags. (*Transantiago, 2008*) (*Trossen Robotics, 2008*) (*Costanera Norte, 2008*) (*AlienTechnology, 2008*).

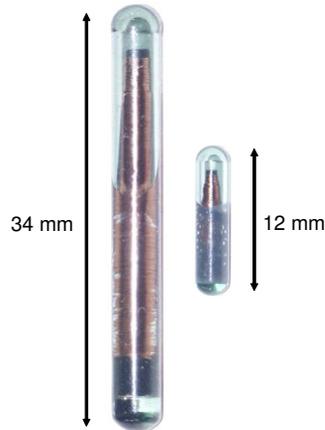


FIGURA 2.4. Tags de vidrio, implantables (Trossen Robotics, 2008).

El desarrollo de la tecnología RFID ha tenido un auge importante en los últimos años. En lo que sigue se muestran algunas de las últimas extensiones en el uso de esta tecnología. Algunas de ellas se relacionan con este proyecto y otras sirven simplemente para ilustrar las capacidades de esta tecnología.

Implante de RFID tags en humanos y animales: El uso en **animales** es más masivo y se ha aceptado hace más tiempo, desde finales de los 80's (Graafstra, 2007). Existen chips para implantación en **humanos** de *VeriChip Corp.* (2008) y en animales de *Philips* y *Trossen Robotics* (2008) (Graafstra, 2007). Obviamente existen reparos sobre un uso masivo de RFID tags implantados en humanos. Muchos se oponen a que el implante se convierta en una exigencia en vez de ser una elección personal (Foster & Jaeger, 2007).

Desarrollo de portales RFID: En (Werb & Lanzl, 1998) se menciona que la tecnología de tags activos permite la detección al pasar por portales (en los que la distancia entre tag y lector es menor a 3 metros), pero que todavía (en 1998) no era suficiente para detectar en espacios cerrados.

Real-Time Location System (RTLS): Esta aplicación permitiría suplantar al GPS en muchos de sus usos actuales. Se presentan tres ejemplos:

- (i) En (Alippi, Cogliati, & Vanini, 2006) se trata un sistema para localizar tags pasivos mediante estadística, se dice que tiene una exactitud de 0,6m en un área de $20 m^2$ (5m x 4m) utilizando 4 lectores.
- (ii) En (Duke, 1998) se habla de un sistema para realizar seguimiento a una red de buses urbanos. Proponen una implementación que en vez de utilizar el querido

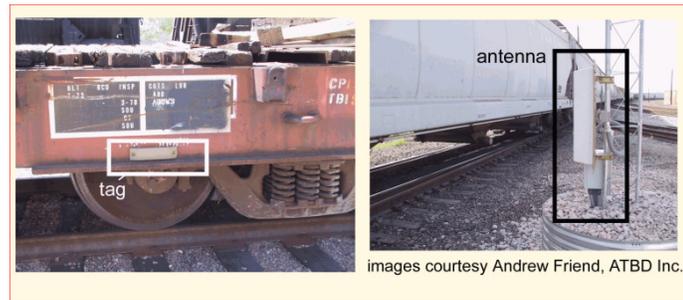


FIGURA 2.5. Tags en trenes de EEUU, son anteriores o reemplazan al GPS (Dobkin, 2007).

GPS de nuestro Transantiago utiliza RFID tags en cada bus. A lo largo del recorrido del bus existen lectores RFID que detectan el paso del bus y envían la información a una central.

- (iii) En (Werb & Lanzl, 1998) se describe un sistema para ubicar personas y cosas en espacios cerrados, como una oficina. Lo llaman Local Positioning System (LPS), en analogía al GPS. Habla de tags activos del doble de ancho de una tarjeta de crédito usando una pequeña batería de 1 año de duración (en 1998) para un alcance de 30 metros.
- (iv) En la misma línea se encuentra el seguimiento de trenes en EEUU, utilizando tags pasivos o semi-pasivos en la norma UHF AAR S918 ver figura 2.5, extraído de (Dobkin, 2007).

RFID en aeropuertos: Ha existido un gran interés por poder desarrollar sistemas RFID que utilicen tags pasivos de gran alcance seguimiento de maletas en las bodegas de los aeropuertos (Cerino & Walsh, 2000), también hay propuestas con tags activos (McCoy, Bullock, & Brennan, 2005) y un estudio sobre la potencia emitida por lectores RFID en el aeropuerto de Hong Kong (Wong et al., 2006).

Tag para pagar peaje en autopistas: Por lo menos 30 países utilizan sistemas parecidos al Televía (*Wikipedia - Electronic toll collection*, 2008).

Tarjetas de proximidad para pago de transporte público: A la fecha existen 1.000 millones de chips Mifare y 7 millones de lectores Mifare vendidos en el mundo (Mifare, 2008).

Tarjetas de proximidad para pago de estacionamientos: Por ejemplo, el estacionamiento del campus San Joaquín.

Control automatizado de acceso de camiones: Una planta de Embotelladora Andina en Talca, desarrollo de Intermec Chile. Sistema en UHF, utilizando tags pasivos pegados en el parabrisas. Se informaron problemas que reducían el alcance; existencia de burbujas de aire entre parabrisas y tag, así como el efecto de las gotas de lluvia. (Información obtenida en conversaciones con Gerente Comercial de Intermec Chile - Darío Morchio)

Llaves de auto con tag RFID. Si la llave no entrega el ID correcto el auto no enciende, a pesar de que el calado de la llave sea correcto (Fiat y Mercedes-Benz).

2.1. Clasificación de tags

RFID es una denominación común a una serie de desarrollos tecnológicos con costos y capacidades muy diferentes entre ellos. Una buena forma de entender RFID es realizar clasificaciones según tres aspectos relevantes para los tags:

- (i) Clasificación por fuente de energía del tag.
- (ii) Clasificación por capacidad de almacenamiento y posibilidad de lectura escritura.
- (iii) Clasificación por frecuencia portadora utilizada, que incide en la forma de conectarse con el lector.

2.1.1. Clasificación por fuente de energía del tag

En cuanto a la fuente de energía del tag existen tres tipos de RFID tags: Pasivos, semi-pasivos y activos.

- Los pasivos no utilizan baterías y por lo tanto son más robustos y de menor costo, son energizados y responden utilizando el campo generado por el lector.
- Los semi-pasivos utilizan *backscattering* para responder pero su circuito interno se activa con baterías.
- Los activos utilizan baterías para activarse y para enviar la señal de respuesta.

La figura 2.6 muestra el funcionamiento de cada uno de estos tres tipos de tags. Para mayor detalle sobre cada uno de estos tags, revisar (Bridgelall, 2003) y (Dobkin, 2007).

2.1.2. Clasificación por capacidades

En la tabla 2.1 aparece la clasificación de tags de EPCglobal Network, que se enfoca en las capacidades (Banks, Hanny, Pachano, & Thompson, 2007). EPCglobal Network es

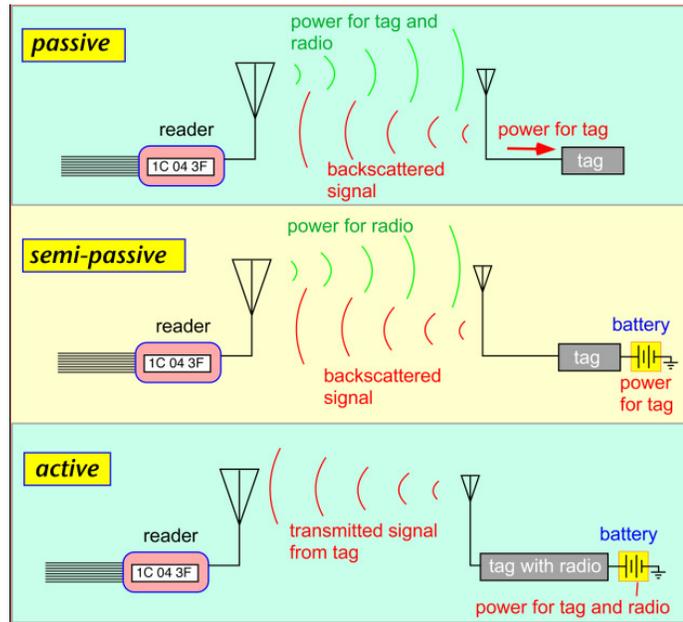


FIGURA 2.6. Esquema de funcionamiento de tags pasivos, semi-pasivos y activos (Dobkin, 2007).

una organización internacional que estandariza el equivalente al código de barra para tags RFID (<http://www.epcglobalinc.org/>).

Sin embargo los tags EPC Gen 2 son calificados como **Clase 1** a pesar de poder modificar su ID en repetidas ocasiones. No califican como **Clase 2** por no poseer comunicación segura (encriptada).

2.1.3. Clasificación por frecuencia portadora

Para tener claro la división que se hace del espectro electromagnético se presenta la tabla 2.2 (Banks et al., 2007). RFID se utiliza en tres bandas de frecuencia: LF, HF y UHF. En la tabla 2.3 se indica el tipo de tag/lector utilizado para cada banda, la diferencia está en el tipo de antena (Banks et al., 2007). En la figura 2.7 aparecen tags en cada una de las bandas usadas en RFID. Además en la tabla 2.4 se presenta una clasificación por frecuencia, indicando usos, pros, contras y rango de lectura (Graafstra, 2006).

Las bandas LF y HF son bandas ISM libres en todo el mundo, aunque las frecuencias exactas varían ligeramente entre países. En UHF (900MHz) las bandas disponibles no son iguales en todo el mundo. Además existen diversas limitaciones de potencia. La distribución de frecuencias permitidas se observa en la Figura 2.8 extraída de (Dobkin, 2007).

TABLA 2.1. Clasificación de tags según EPC (Banks, 2007)

Clase	Energía	Rango	Memoria	Comunicacion	Periféricos	Costo
0	No	< 3 m	1 a 96 bits, Solo Lectura Only	<i>Backscatter</i>	No	Bajo
1	No	< 3 m	1 a 96 bits, Lectura/Una Escritura	<i>Backscatter</i>	No	Bajo
2	No	< 3 m	1 a 96 bits, Lectura/Escritura	<i>Backscatter</i>	Seguridad	Medio
3	Asistido por batería	< 100 m	< kbytes, Lectura/Escritura	<i>Backscatter</i>	Seguridad, Sensores	Alto
4	Asistido por batería	< 300 m	< 100 kbytes, Lectura/Escritura	Transmisión Activa	Seguridad, Sensores	Alto
5	Asistido por batería, conexión AC/DC	> 300 m	Ilimitada, Lectura/Escritura	Transmisión Activa	Seguridad, Sensores, pueden comunicarse con otros tags	Muy Alto

TABLA 2.2. Clasificación de radiofrecuencias (Banks, 2007).

	Nombre en inglés	Frecuencia	Longitud de onda
ELF	Extremely low frequency	3 - 29 Hz	100.000 - 10.000 km
SLF	Super low frequency	30 - 299 Hz	10.000 - 1.000 km
ULF	Ultra low frequency	300 - 2999 Hz	1.000 - 100 km
VLF	Very low frequency	3 - 29 kHz	100 - 10 km
VLF	Very low frequency	3 - 29 kHz	100 - 10 km
LF	Low frequency	30 - 299 kHz	10 - 1 km
MF	Medium frequency	300 - 2999 kHz	1 km - 100 m
HF	High frequency	3 - 29 MHz	100 - 10 m
VHF	High frequency	30 - 299 MHz	10 - 1 m
UHF	Ultra high frequency	300 - 2999 MHz	1 m - 10 cm
SHF	Super high frequency	3 - 29 GHz	10 - 1 cm
EHF	Extremely high frequency	30 - 299 GHz	1 cm - 1 mm

TABLA 2.3. Tipos de antenas para tag (Banks, 2007).

Frecuencia	Campo	Tipo de Tag	Tipo de Antena
LF	Cercano	Inductivo	Bobina
HF	Cercano	Inductivo	Bobina
UHF	Lejano	Radiativo	Polarización Lineal o Circular

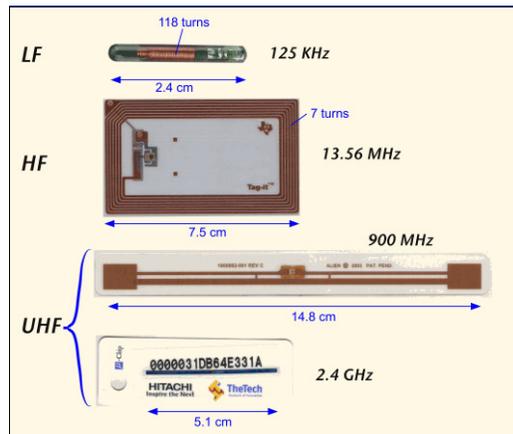


FIGURA 2.7. Tags en las bandas LF, HF y UHF (Dobkin, 2007).

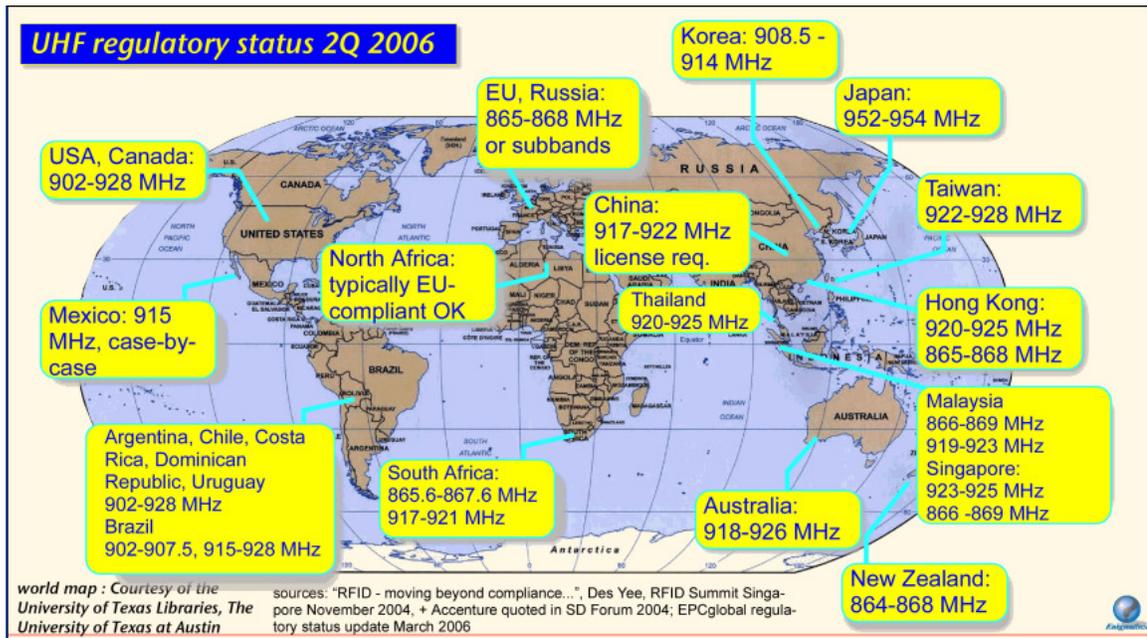


FIGURA 2.8. Frecuencias UHF disponibles en el mundo (Dobkin, 2007).

TABLA 2.4. Comparación de RFID a distintas frecuencias (Graafstra, 2006)

Frecuencia	Uso	Pro/Con	Rango
125kHz–148kHz Tipo: Pasivo	Rastreo de animales (ISO 11784/11785), control de acceso y aplicaciones OEM.	Señal se relaciona con líquidos y metales bastante bien. Tags de mayor costo por las antenas largas y de cobre sólido.	1/2" a 4" es lo típico. 6" a 12" o más podría ser posible con equipo especializado.
13.56MHz Tipo: Pasivo	EAS (anti-robo), manejo de libros y documentos, control de acceso y aplicaciones OEM.	Las antenas pueden ser impresas en substrato o etiquetas, bajando el costo de los tags. Interferencia importante de metales	Alcance pulgadas a unos cuantos pies dependiendo del hardware del lector y del tipo de tag.
433MHz (y 2.5GHz) Tipo: Activo	Pago de peaje en carreteras, manejo de vehículos/flotas, rastreo de valores y más.	Mucho rango. Costo alto por tag. Usan batería, por lo que tienen vida útil reducida (típicamente 5 años)	Típicamente unos 30 pies, pero puede llegar a cientos de pies.
915MHz Tipo: Pasivo	Rastreo en cadena de abastecimiento y aplicaciones OEM.	Tag de muy bajo costo. Alto rango. Capacidades de anti-colisión permite lectura simultánea de tags. Interferencia importante de líquidos y del cuerpo humano	10' con una antena simple y 20' entre dos antenas. Mayores rangos con hardware especial.

2.2. Acoplamiento Magnético vs Electromagnético

En LF y HF el acoplamiento es magnético. En este caso la señal generada por el lector forma líneas de campo magnético. En UHF las señales son electromagnéticas, y por tanto forman una onda radiativa que se atenúa al alejarse de la antena. Esta diferencia en la comunicación se debe a las longitudes de onda de las señales en cada banda de frecuencia. Siendo λ la longitud de onda de una señal en radiofrecuencia, existe una convención según la cual a una distancia menor que 0.16λ ($\lambda/2\pi$) se encuentra el campo cercano de la antena y a mayor distancia se tiene el campo lejano (o transición al campo lejano) (Finkenzeller, 2003).

- LF 125kHz, $\lambda = 2.4\text{km}$, $\frac{\lambda}{2\pi} = 384\text{m}$.
- HF 13.56MHz, $\lambda = 22.1\text{m}$, $\frac{\lambda}{2\pi} = 3,54\text{m}$.
- UHF 900MHz, $\lambda = 33\text{cm}$, $\frac{\lambda}{2\pi} = 5,28\text{cm}$.

La Figura 2.9 ilustra la diferencia entre acoplamiento magnético en el campo cercano de la antena y acoplamiento electromagnético en el campo lejano. La figura 2.10 compara rangos de lectura de ambas formas de acoplamiento.

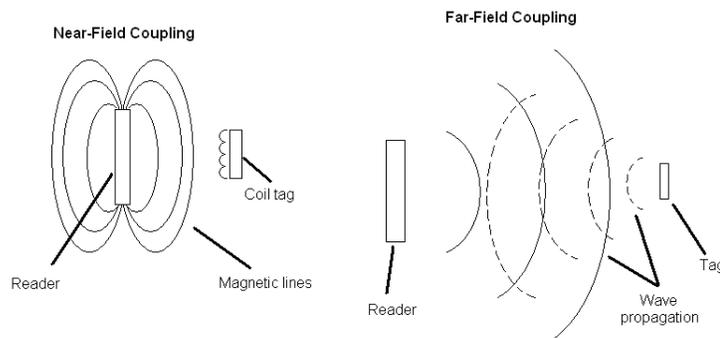


FIGURA 2.9. Acoplamiento de campo cercano (inductivo) y campo lejano (electromagnético - radiativo) (Banks, 2007).

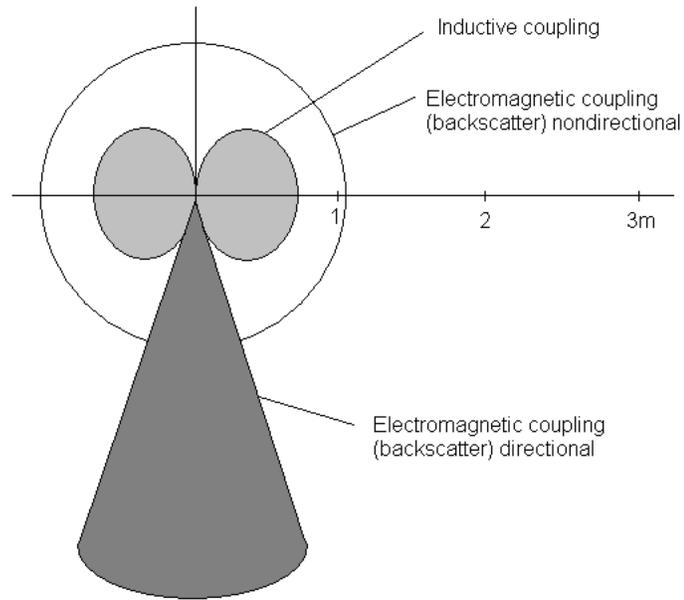


FIGURA 2.10. Esquema comparativo de rango de lectura, acoplamiento magnético vs. electromagnético. En la intersección de los ejes hay una antena para las señales electromagnéticas y una espira para el caso de acoplamiento inductivo (Finken-zeller, 2003).

2.3. Normas RFID

Tal como se ha mencionado en secciones anteriores, existe una variedad de normas RFID en las bandas LF, HF y UHF. La Tabla 2.5 clasifica estas normas por frecuencia y según energización; pasivas, semi-pasivas y activas. Más detalles sobre cada una de estas normas se presentan en el Anexo A.

TABLA 2.5. Lista de normas RFID, por frecuencia y energización (Dobkin, 2007).

Tipo de tag	Frecuencia					
	125/134 kHz	5-7 MHz	13.56 MHz	303/433 MHz	860-960 MHz	2.45 MHz
Pasivo	ISO 11784/5	ISO10536	Mifare		ISO18000-6A,B,C	ISO18000-4
	ISO18000-2	iPico DF/iPX	ISO14443		EPC class 0	Intellitag
	HiTag		Tag-IT		EPC class 1	μ - chip
			ISO15693		Intellitag	
			ISO18000-3		Title 21	
			TIRIS		AAR S918	
			Icode		Ucode	
Semi-pasivo					AAR S918	ISO18000-4
					Title 21	Alien BAP
					EZPass	
					Intelleflex	
					Maxim	
Activo				ANSI 371.2		ISO18000-4
				ISO18000-7		ANSI 371.1
				RFCCode		

2.4. Rango de lectura y escritura de tags RFID pasivos

La temática de esta tesis está estrechamente ligada al problema del rango de lectura/escritura en sistemas RFID utilizando tags pasivos.

No existe actualmente un nivel de estandarización tal que permita definir inequívocamente el rango de alcance de los tags RFID pasivos. Simplemente se encuentran diferentes productos de distintos fabricantes, cada uno de ellos con sus propias especificaciones. A continuación se tienen algunos ejemplos:

- Según la normativa ISO se puede decir que las tarjetas de proximidad, definidas por la norma ISO 14443, tienen un alcance de unas 3 pulgadas (7,62 centímetros) (*Wikipedia - RFID*, 2008). Las tarjetas de vecindad, definidas por la norma ISO 15693, alcanzan 1,5 metros (*Wikipedia - RFID*, 2008).
- En las preguntas frecuentes de RFID Journal (*RFID Journal*, 2008) se dice que tags de baja frecuencia tienen un alcance de 0.33 metros, tags de alta frecuencia llegan al metro y tags de UHF llegan a 3-6 m. Según esta información, el rango aumenta con la frecuencia. Sin embargo en UHF los metales y al agua afectan el desempeño de los sistemas (*RFID Journal*, 2008).
- El sitio web de Philips indica que su tarjeta *Mifare Ultralight* tiene un alcance de hasta 10 cm (Mifare, 2008).
- En (Alippi et al., 2006) mencionan que los tags pasivos están alcanzando una distancia de lectura de 13 m y que en la misma empresa, *Trolley Scan (Pty) Ltd.*, se están haciendo ensayos para 30 m.
- En (Nakamoto et al., 2007) se diseña un sistema en los 953 MHz que tiene un rango de lectura de entre 0-4,3 m.

En la tabla 2.6 se aprecia el rango para distintas normas, además incluye las frecuencias portadoras, sub-portadoras y la tasa de datos medida en baudios.

2.5. Colisión y algoritmos anticoliisión

En RFID existe el problema de colisión de datos. El fenómeno puede ser ejemplificado de la siguiente manera: Un lector pide que le contesten y se puede dar que haya más de un tag en la zona activa. Si contesta más de un tag al mismo tiempo se produce colisión y no se puede recibir correctamente el mensaje. Existen procedimientos anticoliisión estándares y un buen enfoque es CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*). En este, cada dispositivo

TABLA 2.6. Ancho de banda RFID a 13.56 MHz y 125 kHz (Finkenzeller, 2003).

Sistemas	Baudios	$f_{sub-portadora}$	f_{TX}	Rango
ISO 14443	106 kBd	847 kHz	13.56 MHz	0-10 cm
ISO 15693 corto alcance	26.48 kBd	484 kHz	13.56 MHz	0-30 cm
ISO 15693 largo alcance	6.62 kBd	484 kHz	13.56 MHz	0-70 cm
Sistemas de largo alcance	9.0 kBd	212 kHz	13.56 MHz	0-1 m
Sistemas en LF	0-10 kBd	Sin sub-portadora	<125 kHz	0-1,5 m

antes de empezar a transmitir sensa el ambiente para detectar si hay una transmisión activa en su banda, si hay transmisión, espera a que esta termine o se cambia de canal, si el canal está desocupado el dispositivo transmite. El problema con esa técnica aplicada a RFID radica en que la energía disponible en los tags pasivos no permite algoritmos sofisticados. Además, tags pasivos generalmente solo son capaces de escuchar al lector y no a otros tags. Dadas estas limitaciones en la capacidad de los tags, es el lector quien debe controlar el funcionamiento de los tags y evitar la colisión. Actualmente en sistemas RFID pasivos se utilizan dos enfoques para enfrentar el problema de la colisión: **Búsqueda Binaria** y **Aloha Ranurado**.

2.5.1. Búsqueda Binaria (*Binary Search*)

En este enfoque anticolidión el lector solicita que todos los tags energizados respondan. En caso de exista más de un tag activado se producirá una colisión de datos. Sin embargo, el lector será capaz de detectar la colisión y definir una estrategia para evitarla. La detección de la colisión se hace posible al utilizar codificación Manchester en el canal de subida (tag a lector). Por ejemplo, si dos tags han respondido la señal recibida por el lector será una suma de ambas. Por lo tanto los bits que tienen el mismo valor en ambos mensajes llegarán correctamente, pero los bits diferentes se sumarán formando una secuencia inválida, porque la codificación Manchester logra que dos bits diferentes superpuestos generen una señal que no corresponde ni a un 1 ni a un 0, indicando que en ellos hubo colisión (Figura 2.11). Un bit de datos colisionado indica que en algún tag tiene valor 0 y en otro tag tiene valor 1, de tal forma que el lector solicita una nueva respuesta, pero esta vez indica que respondan solamente los tags que tengan ese bit ya sea en 0 o en 1 (Figura 2.12). Si no ha cambiado el número de tags energizados el número de colisiones habrá disminuido, por lo menos ese bit ya no colisionará. Nuevamente se escoge alguno de los bits colisionados y se le aplica el mismo procedimiento. El lector sigue en este procedimiento hasta que logra obtener un

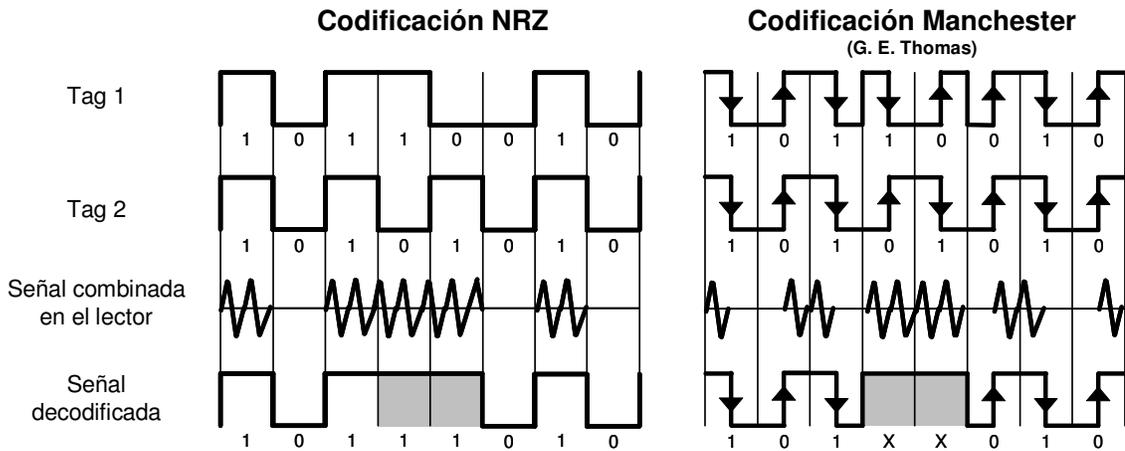


FIGURA 2.11. Codificación NRZ no detecta colisión, codificación Manchester detecta colisión a nivel de bit (Finkenzeller, 2003).

ID limpio, sin ninguna colisión. Recién en ese momento el lector habrá identificado un tag y ahora podrá escribir en él o leer datos adicionales. Para obtener los IDs de los demás tags en zona activa se deberá desactivar este tag. Si no se realiza esta acción, al intentar obtener nuevamente un ID válido mediante *binary search* siempre obtendrá el ID de este tag.

El objetivo de este enfoque de anticollisión es escoger alguno de los tags presentes y mantener un intercambio de datos con él. Por ese motivo en Mifare - ISO 14443-A (tarjetas bip) se utiliza este algoritmo. En caso de querer obtener solamente el ID de cada uno de los tags presentes se debe aplicar búsqueda binaria, individualizar un tag y luego desactivarlo, repitiendo este proceso hasta que ningún tag responda. Dada la tasa de datos disponible en esta norma, el proceso descrito resulta ineficiente para grandes poblaciones de tags que permanecen por poco tiempo en la zona activa del lector.

2.5.2. Aloha Ranurado (*Slotted Aloha*)

Este algoritmo enfrenta las colisiones repartiendo las respuestas de los tags en espacios de tiempo. El lector informa la cantidad de espacios de tiempo disponibles y cada tag activado escoge aleatoriamente en cual de esos espacios transmitirá su respuesta o ID (Figura 2.13). En este algoritmo, el lector tiene la capacidad de modificar la cantidad de espacios de tiempo disponibles, adecuándose al número de tags presentes. El desempeño de este tipo de protocolo anticollisión esta descrito en (Finkenzeller, 2003) y básicamente se resume en una ecuación matemática que relaciona el nivel de ocupación del tiempo G

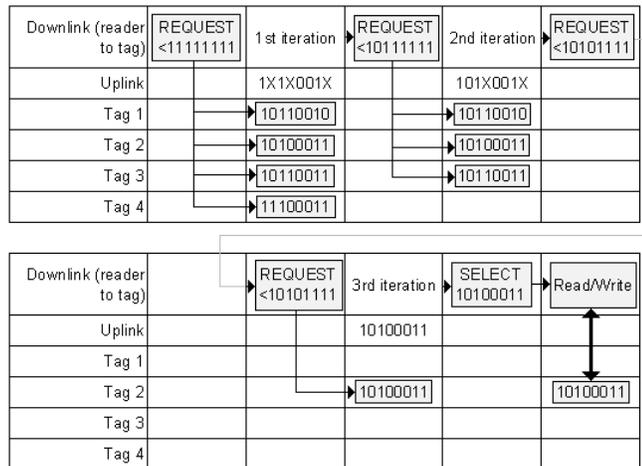


FIGURA 2.12. Algoritmo de búsqueda binaria (Finkenzeller, 2003).

con la tasa de detecciones sin colisión en el tiempo S :

$$S = G \cdot e^{(-G)}$$

La máxima tasa de detección S de este procedimiento es 36,8% y se da para una ocupación de $G = 1$. Con lo anterior, al tener 16 espacios de tiempo disponibles y 16 tags en la zona activa del lector, en promedio, solamente $16 \cdot 36,8\% = 5,9$ tags serán leídos correctamente. Otra forma de ver el desempeño de aloha ranurado es la expresión matemática de la probabilidad q de que una transmisión cualquiera se reciba sin colisiones:

$$q = \frac{S}{G} = e^{(-G)}$$

En las tarjetas multivía (ISO 14443-B) se utiliza este algoritmo. A través de él se obtienen los IDs de los tags activados. Luego el lector escoge uno de esos tags y mantiene con él una transacción. La ventaja de aloha ranurado es que en una sola ronda de lectura el lector es capaz de identificar a más de un tag. El problema es que en ISO 14443-B el ID proporcionado por el tag es aleatorio (PUPI¹) y cambia con cada energización del tag. Así, para obtener el ID real de la tarjeta se debe utilizar el PUPI para acceder al tag y solicitar que responda con su ID real. Este requerimiento hace que el rendimiento de aloha ranurado para ISO 14443-B sea similar al de búsqueda binaria para ISO 14443-A.

¹PUPI: *Pseudo Unique PICC Identifier* (identificador de PICC pseudo único). PICC: *Proximity Integrated Circuit Card* (tarjeta con circuito integrado de proximidad), es el nombre que recibe el tag en el estándar ISO 14443

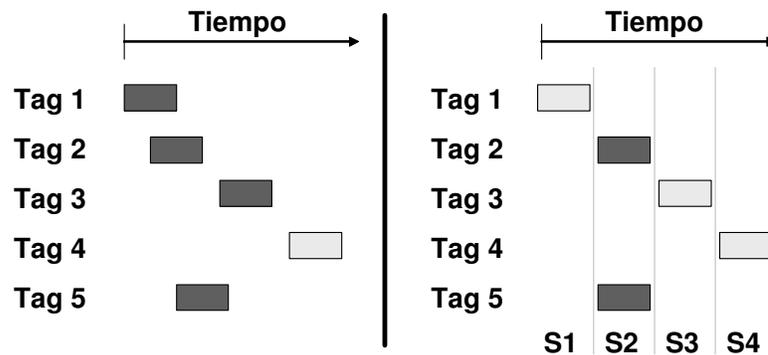


FIGURA 2.13. Tags responden sin orden, en tiempos aleatorios (aloha) o con casillas de tiempo asignadas (aloha ranurado). Los rectángulos oscuros corresponden a transmisiones que han colisionado, mientras que los rectángulos claros corresponden a transmisiones sin colisión.

En UHF la situación es similar. EPC Gen 2 utiliza *slotted aloha* como algoritmo anti-colisión. En esta norma RFID también sucede que la respuesta inicial del tag consiste en un número aleatorio, más corto y diferente del ID del tag, pero en este caso el ID real se obtiene en el mismo *slot* y con intercambio de datos. Dado que en esta banda de frecuencia el ancho de banda disponible es mayor que en ISO 14443-B, es posible lograr tasas de datos mucho mayores (hasta 640 kbps).

2.6. Resumen comparativo RFID a diferentes frecuencias

(Dobkin, 2007) define muy bien las diferencias y sutilezas existentes en RFID. La elección de la banda de operación (LF, HF o UHF) determina una serie de consecuencias:

- La operación en LF y HF involucra acoplamiento inductivo y rangos comparables al tamaño de la antena; en UHF el rango está limitado por la potencia transmitida.
- Cada lector RFID, junto con su antena, tiene un campo de acción en el cual es capaz de identificar tags, conocido también como zona de lectura. Zonas de lectura mediante acoplamiento inductivo son pequeñas y simples, su campo de acción es continuo en el espacio y puede ser representado por ecuaciones de relativa sencillez; las zonas de lectura radiativas son mayores pero complejas; el efecto de la multitrayectoria de las señales, así como elementos absorbentes y reflectantes, presentes en la zona, producen discontinuidades en la intensidad de la señal. En este último caso, además lectores aledaños pueden interferir.

- Los tags LF usan espiras con muchas vueltas; los HF tags necesitan menos vueltas
- Los tags UHF usan antenas tipo dipolo simple fáciles de fabricar, pero su tamaño está asociado a la longitud de onda de la radiación. Así, al necesitar un tag de tamaño reducido se debe adaptar el diseño de la antena dando lugar a variados diseños y características.
- La radiación LF penetra agua y materiales acuosos por mucha más distancia que un sistema en HF o UHF; La penetración de HF en el agua es comparable a rangos de lectura normales para HF; la penetración de UHF/microondas en el agua es muy pequeña comparada con el rango de lectura típico de estos sistemas en el aire, excepto para el caso de acoplamiento de campo cercano en UHF (rango menor a 5,3 cm).
- La radiación LF puede penetrar capas de metales conductivos; la radiación HF y UHF puede ser bloqueada efectivamente por delgadas capas de metal.
- Tags LF están limitados a una baja tasa de datos; pero HF y UHF tags permiten decenas o centenas de kbps.

Las diferentes características asociadas con cada banda de frecuencia son las responsables de que las aplicaciones de cada una sean diferentes.

2.6.1. RFID en la banda LF

“RFID en LF es particularmente apropiado para ID animal y humano. Los tags y lectores no se ven mayormente afectados por agua y sal. Rangos de 1m o menos son aceptables y muchas veces deseables. Los tags son relativamente costosos (unos pocos US dólares), pero esto no es un impedimento importante en la identificación de ganado costoso, mascotas queridas o gente importante. Los tags pueden ser colgados de la oreja del animal, insertados en su estómago (en el caso de una vaca), o implantados bajo la piel usando un transponder encapsulado de vidrio como el de la figura 2.4. Generalmente es sencillo lograr que solo un tag por vez esté en la zona de lectura; las vacas se pueden ingresar por un portal a una pieza en la que solo cabe una por vez; y las personas y mascotas generalmente son inspeccionados con un lector portable de bajo alcance. Las personas y los animales en estos casos no se mueven muy rápido, por lo que se tienen varios segundos disponibles para leer un solo tag, y las bajas tasas de datos no son un problema.” (Dobkin, 2007)

“Los tags en LF también son populares para control de acceso. Lectores de corto alcance en LF pueden ser implementados a muy bajo costo, debido a que las señales de

100kHz son muy fáciles de manejar con la circuitería digital moderna. Los tags pueden tener forma de tarjeta de crédito, con una antena bobina de varias vueltas, y usados como credenciales que permitan la entrada a lugares restringidos. Rangos de unos pocos centímetros, de cuasi contacto (insertando la tarjeta en una ranura, reemplazo directo de las tarjetas con contacto) son aceptables, y aseguran que solo una identificación es presentada al lector cada vez. Los tags en LF también pueden tener forma de llavero, con un mayor número de vueltas en la bobina para compensar el tamaño reducido, así proveen identificación única del chofer para un lector montado en el automóvil. Nuevamente, solo un tag está presente por vez y un retardo de 1 s es aceptable. Los tags en LF son útiles en la identificación robusta de cilindros metálicos de gas comprimido.” (Dobkin, 2007)

2.6.2. RFID en la banda HF

“Los tags en HF son usados ampliamente en tarjetas inteligentes sin contacto, transponders en forma de tarjetas de crédito que contienen un circuito integrado y una antena y permiten transacciones financieras seguras. El rápido incremento en la energía del tag al irse acercando al lector indica que un pequeño detrimento del alcance permite proveer la energía necesaria para operaciones criptográficas, así los tags HF pueden tener comunicaciones seguras con el lector. El bajo alcance también ayuda contra la interceptación o la activación inadvertida de las tarjetas cuando están por ejemplo, dentro de la billetera o cartera del usuario. Altas tasas de datos pueden mantener un intercambio relativamente complejo que permite transacciones financieras sofisticadas. Como los sistemas LF, identificaciones equipadas con HF pueden ser usadas para control de acceso. El uso de tags HF en pasaportes y documentos de viaje está en crecimiento.” (Dobkin, 2007)

“Los tags HF son ampliamente usados en seguimiento de bienes y en la cadena de abastecimiento. Los HF tags tienen un amplio espacio de ID para permitir identificadores únicos para una cantidad considerable de items. En la aplicación de assets, el bajo rango de lectura de los sistemas HF puede ser un desafío, típicamente enfrentado con antenas grandes, tags grandes, condiciones a los procesos que fuerzan al item a pasar suficientemente cerca al lector, y lectores portátiles o de mano. La disponibilidad de alta potencia en un corto rango permite a los tags HF tener un gran espacio de memoria, unos cuantos miles de bytes, permitiendo al usuario registrar una cantidad sustancial de información única en un tag que esté en la zona activa. Esa capacidad es muy útil cuando los usuarios necesitan interactuar con los tags cuando están fuera del alcance de redes o bases de datos relevantes.” (Dobkin, 2007).

2.6.3. RFID en la banda UHF

“Los tags UHF se benefician del potencial de largo alcance. Los diseños de antena UHF relativamente simples, involucran solamente pocos features y no tienen dimensiones críticas ni necesidad de cruzamientos o múltiples capas, ayudan a reducir el costo de fabricación. Sin embargo, por lo menos un componente de la circuitería del tag debe operar a frecuencias muy altas, lo que hasta muy recientemente le agregaba costo significativo a la circuitería. Los tags en UHF son usados ampliamente en cobro de peaje a automóviles y seguimiento de carros de tren, donde rangos de varios metros permiten una flexibilidad en la instalación. Se usan cada vez más en la cadena de abastecimiento, seguimiento de equipaje, y seguimiento de assets, donde el potencial futuro de tags de muy bajo costo es importante, y relativos altos rangos de lectura agregan flexibilidad a la aplicación (con el costo de cierta ambigüedad en la localización de los tags leídos). Tags en UHF equipados con baterías pueden tener rangos de decenas y centenas de metros, y son usados para seguimiento de containers y localización de assets caros en grandes espacios cerrados.” (Dobkin, 2007)

“La distinción entre operación de UHF a 860-960 MHz y 2.4 GHz es más sutil que la diferencia entre sistemas inductivos y radiativos. La regulación mundial en la banda 860-960 MHz es muy compleja, junto con RFID en esas frecuencias también hay telefonía celular y otras aplicaciones populares, diferentes países han hecho diferentes elecciones sobre lo que puede operar ahí. Por otro lado, la banda de 2.4-2.45 GHz está disponible para operar sin licencia en casi todos lados y por eso está copada de otros equipos por lo que la interferencia es un tema importante. Generalmente los tags en 2.4 GHz son más pequeños que los de 900 MHz, lo que hace más conveniente su uso y su costo, pero reduce su alcance (1-3 m en 2.4 GHz vs. 2-10m en 900 MHz).” (Dobkin, 2007)

2.7. Tecnología RFID escogida: UHF EPC Gen 2

Luego de la introducción a los sistemas RFID se procede a revisar la solución escogida —para resolver el problema definido en el Capítulo 1— y los motivos que la sustentan.

En un principio se quiso utilizar la tarjeta bip! (Mifare - ISO 14443-A). Se analizó en detalle esta posibilidad (ver Anexo C). Las principales conclusiones de ese análisis indican que es inadecuado utilizar el sistema Mifare, diseñado para alcanzar 10 cm, para realizar una lectura a 57 cm de distancia. El motivo principal es que la potencia emitida por la antena sería en el mejor de los casos 14,5 veces mayor a la permitida por las organizaciones

regulatorias ITU-R, ETSI y FCC (la regulación chilena se basa en la ETSI). Un problema secundario es el de los algoritmos anticolidión y tasas de datos disponibles en esta banda. Hoy en día la transacción de una tarjeta bip demora alrededor de 200 ms, una identificación podría reducirse a 100 ms, lo que no permitiría la rápida identificación de un grupo de tarjetas en movimiento pasando por un portal de lectura.

Una alternativa muy cercana a la anterior es utilizar la norma ISO 15693, que funciona en la misma frecuencia de la tarjeta bip, pero permite un mayor rango de lectura. El problema con esa norma es que no tiene tantas capacidades de cifrado y seguridad en la transacción como Mifare, por lo que al parecer no podría reemplazar el sistema de pago actual. Además por funcionar en la misma frecuencia posiblemente una tarjeta dual Mifare + ISO 15693 no sería factible.

Por lo tanto quedaba dando vuelta la idea de una tarjeta dual, en que la transacción se hace con la parte Mifare de la tarjeta y el conteo y registro de pasajeros se realiza con una segunda tecnología. Las posibilidades restantes son tags en las bandas LF y UHF.

En la banda de frecuencia LF existen normas con alcance de 1,5m (Hitag). Sin embargo los algoritmos anticolidión y las tasas de transferencia de datos son muy pobres. Mayores detalles en Anexo B

En este escenario la única alternativa factible es utilizar UHF para conteo y detección. Se analizaron los equipos y tags disponibles en el mercado internacional y se escogió la norma UHF Gen 2. Esta norma se escogió por su alto grado de estandarización y su gran difusión debido a su aceptación mundial para aplicaciones de inventario.

El siguiente párrafo, traducido de (Dobkin, 2007), es muy relevante para la presente tesis, sustenta la decisión sobre la tecnología escogida:

“Los tags pasivos pueden funcionar a cualquier frecuencia. Tags pasivos en LF y HF se usan mucho en identificación de animales, inmovilización de automóviles y aplicaciones de tarjetas inteligentes. Sin embargo, tags en LF siempre estarán limitados a bajas tasas de datos y no son apropiados para la mayoría de las aplicaciones de la cadena de abastecimiento. Los tags en HF pueden soportar altas tasas de datos, pueden ser pequeños y pueden tener un alcance de varios metros —pero no pueden lograr todas esas cosas al mismo tiempo. Tags en UHF pueden proveer todos estos beneficios en un solo paquete. A pesar de que no todas las aplicaciones de la cadena de suministro necesiten un alto alcance, hay un beneficio tremendo en la flexibilidad de tener una tecnología de tag y lectores que

permite leer el tag a distancia cuando sea necesario. Esta versatilidad es un argumento poderoso para el uso de UHF en la cadena de suministro.”

La tecnología UHF EPC Gen 2 es la más difundida hoy en día en aplicaciones de largo alcance. Existen diversas empresas dedicadas a la fabricación de lectores, tags y desarrollo de nuevas tecnologías compatibles con la normas. Debido a estas razones es de suponer que en el futuro cercano se sigan comercializando equipos y tags de esta norma. No es posible afirmar lo mismo sobre el abastecimiento en otras normas RFID de largo alcance.

Existe un tema delicado en RFID UHF pasivo y es el de la interferencia de líquidos y cuerpo humano en la señal, los que degradan fuertemente el desempeño del sistema. Sin embargo existen alternativas para suplir este problema; utilización de múltiples antenas variando su localización, haciendo uso del concepto de diversidad o tags semi-pasivos que permiten un mejor desempeño en ambientes complejos.

A continuación se exploran con mayor detalle los sistemas RFID en UHF EPC Gen 2. Los fabricantes de equipos y tags de esta norma se pueden agrupar en tres industrias: fabricantes de lectores, fabricantes de antenas para lectores y fabricantes de tags.

2.7.1. Lectores

Existen lectores de una sola antena, en que la antena está integrada al lector, y también existen lectores multi-antena. Algunos de ellos con comunicación por Ethernet y otros por señales TTL o RS-232. Hay lectores diseñados para aplicaciones en lugares cerrados y otros que pueden funcionar a la intemperie. Todas estas posibilidades hacen que los precios de estos equipos sean muy diversos.

Los equipos de mejor desempeño son los lectores largo alcance. Generalmente tienen conexión para 4 u 8 antenas, comunicación Ethernet, gran parte del procesamiento de señales es realizado por firmware. Ese firmware permite ejecutar aplicaciones sobre Java o Linux y es actualizable, permitiendo soportar los últimos protocolos creados.

En la búsqueda de equipos se obtuvo un análisis comparativo de lectores para el mercado Europeo. Se hicieron intentos por comunicarse con cada uno de los 7 fabricantes mencionados en el análisis comparativo (Sirit IN510, Impinj Speedway, Motorola XR480EU, Intermec IF61, Alien ALR8800, Caen A948EU, Feig LRU2000). Solamente se pudo hacer contacto contactar con Sirit (eFalcom Argentina), Intermec (Intermec Chile) y Caen (Casa matriz en Italia).

2.7.2. Antenas para lectores

Existen antenas de polarización lineal horizontal, lineal vertical y de polarización circular. Las antenas parabólicas presentan mayor ganancia y direccionalidad por lo que podrían ser útiles en algunas aplicaciones. Sin embargo no son comunes en UHF RFID, debido a que la normativa de FCC² permite transmitir a máxima potencia (1 W - 30 dBm) solo con antenas de hasta 6dBi de ganancia.

Las antenas de polarización circular van variando su polarización en el ciclo de la señal, pasando por la polarización horizontal y por la vertical. Este tipo de antenas se puede utilizar sin conocer la polarización del tag, debido a la rotación de su polarización en algún momento tendrán la polarización adecuada para el tag. La rotación también es motivo de que su ganancia efectiva con tags de antenas tipo dipolo simple sea 3 dB menor³ comparada con una antena lineal con polarización adecuada.

2.7.3. Tags

Existen variados tags, básicamente difieren en su tamaño y en el diseño de antena que usan. Además podría existir una diferencia en el circuito integrado usado y la eficiencia en consumo energético lograda por él. Otro tema que puede influir en el rendimiento de un tag es una adecuada adaptación de impedancia entre el circuito integrado y la antena (Dobkin, 2007) (Finkenzeller, 2003). Es importante para nuestro caso el hecho que cercanía de la antena del tag a materiales metálicos, agua y tejido vivo puede afectar su impedancia, degradando la adaptación entre antena y circuito integrado.

El diseño de antenas de tags comienza generalmente en un dipolo clásico, luego se comienza a deformar y adaptar hacerlo caber en un tamaño más reducido. Existen tags con doble dipolo, cada dipolo perpendicular al otro, en que el circuito integrado intermitentemente se conecta a cada dipolo. En caso de conectar un circuito integrado directamente a ambos dipolos el resultado es equivalente a un dipolo rotado, y por lo tanto se pierde la capacidad de operar en dos polarizaciones. (Dobkin, 2007)

Tarjetas en la norma EPC Gen 2, de tamaño similar a la tarjeta bip, son sencillos de conseguir en el mercado. En cambio, las tarjetas duales, incluyendo un tag Mifare 1k y un tag EPC Gen2 juntos en una misma tarjeta no son un producto estándar. Se encontraron

²*Federal Communication Commission* - Comisión Federal de Comunicaciones de EEUU

³Una diferencia de potencia de 3 dB equivale a un factor de 1/2. En el caso de antenas de polarización circular se debe a que la mitad del tiempo la polarización de la antena es adecuada y la otra mitad del tiempo resulta perpendicular a la de la antena del tag.

dos fabricantes de tarjetas dispuestos a producir este tipo de tarjeta: Smartrac (EEUU) y Laitan Corp (Hong Kong - Canadá).

2.8. Compras Realizadas

2.8.1. Lector, antenas y cables

A través de EFalcom (Buenos Aires, Argentina) se adquirió un kit conteniendo:

- 1 equipo Sirit IN510, lector RFID en UHF para la norma EPC Gen 2.
- 4 antenas Poynting modelo PATCH-A0025
- 2 cables Altelicon modelo CA-240, 3 m de largo.
- 2 cables Altelicon modelo CA-240, 8 m de largo.

El precio de la compra fue de \$4.036 USD FOB Santiago.

2.8.2. Tarjetas

Para realizar los experimentos se compraron tags RFID a Laitan Corp (Hong Kong - Canadá). A continuación el detalle:

- 100 tarjetas Duales EPC Gen 2 + Mifare 1k
- 100 tarjetas UHF EPC Gen 2
- 200 calcomanías UHF EPC Gen 2.

El precio total incluyendo costos de envío fue de \$445 USD.

3. MATERIALES, MÉTODOS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

El objetivo de este Capítulo es diseñar experimentos que permitan decidir sobre la capacidad del lector RFID Sirit IN510 para contabilizar e identificar pasajeros en un sistema de transporte subiendo y bajando de un bus. Las variables de control en los experimentos a realizar son las siguientes:

- **Portal**

- Tamaño portal
- Número de antenas
- Tipo de antenas
- Ubicación de las antenas, altura y ángulo

- **Lector**

- Secuencia de selección de antenas (1234, 1111234, 1432, etc).
- Potencia emitida por antena.
- Modo anticolidión, escogiendo parámetros del algoritmo aloha ranurado. $Q_{inicial}$ define el número inicial de espacios de tiempo disponibles en cada ronda de lectura. Q_{maximo} define el número máximo al que puede ascender la cantidad de espacios de tiempo en caso de necesidad (al tener gran cantidad de tags expuestos a la antena del lector). El número de espacios de tiempo s es igual a $2^Q + 1$, con Q variando entre 0 y 15. Por lo tanto s varía entre 1 y 32.769. Cabe destacar que el lector termina una ronda de lectura si obtiene una cantidad de espacios de tiempo sin respuesta (pero este umbral solo es conocido y modificable por el fabricante).
- Modo de lectura alta densidad de datos o un dato por tarjeta. En alta densidad se obtiene mayor información a un costo de mayor probabilidad de colisión (Dependiendo de la sesión a la que se apunte y de la tasa de repetición del comando Select)

- **Participantes**

- Tipo de tarjeta: dual, simple o calcomanía.
- Modo de portar tarjetas, ejemplos: bolsillo, mano, billetera, mochila.
- Velocidad de caminata
- Filas: una o varias, flujo uni-direccional o bi-direccional.

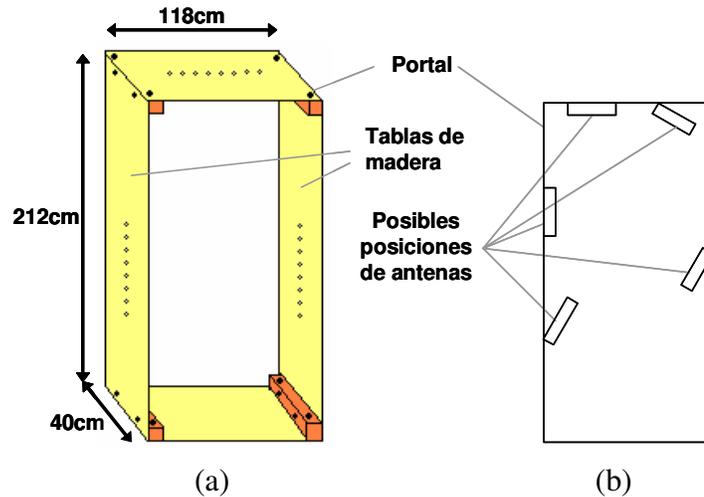


FIGURA 3.1. Maqueta de la puerta del bus. (a) Dimensiones puerta, (b) posibles posiciones de antenas.

A continuación se definen los valores de cada una de las variables enunciadas. Se comienza especificando materiales y equipamiento utilizados. Luego, se presentan ensayos conducentes a definir los valores de las demás variables mencionadas.

3.1. Materiales y equipamiento

Se construyó un portal del tamaño de la puerta de un bus permitiendo el montaje de 4 antenas Poynting modelo PATCH-A0025 (Poynting, 2008) a diferentes alturas y en diferentes puntos del portal (Figura 3.1). El lector usado fue Sirit IN510 (Sirit, 2008) con cables coaxiales Altelicon modelo CA-240 (Altelicon, 2008), para conectar las antenas. Los tags usados fueron:

- 100 tarjetas “simples” UHF EPC Gen 2, de tamaño estándar, fabricadas por Laitan Holding Corp (*Laitan Holding Corp.*, 2008), con inlays ALN-9534 2x2 de AlienTechnology (AlienTechnology, 2008).
- 100 tarjetas “duales” también de tamaño estándar, compuestas por un tag Mifare 1k y un tag UHF-EPC Gen 2, ensambladas por el mismo fabricante (Figura 3.2).

3.2. Calidad de las tarjetas adquiridas

Las 200 tarjetas fueron colgadas una a una en una bolsa plástica a 108 cm frente a una de las antenas, a 80 cm del suelo. Las tarjetas que no eran leídas utilizado una potencia de

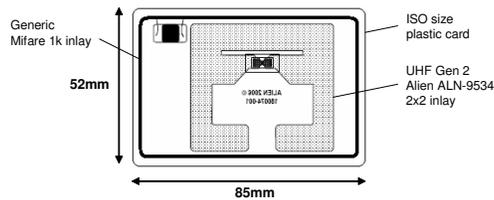


FIGURA 3.2. Tarjetas duales usadas en el experimento.

1 W a la entrada de la antena fueron desechadas, quedando 84 tarjetas simples y 77 tarjetas duales.

3.3. Efecto de la localización de las tarjetas en la tasa de lectura

Se realizaron experimentos preliminares para evaluar el porcentaje de detección que se logra variando el lugar en que se lleva la tarjeta y la posición de las antenas en el portal descrito en la Sección 3.1.

3.3.1. Tarjetas en el bolsillo

Realizando pruebas sencillas y conociendo el comportamiento de señales RFID en UHF se identificó que llevar la tarjeta en el bolsillo es una de las más críticas en cuanto a probabilidad de detección.

En este experimento se colocaron las antenas según la Figura 3.3, 2 antenas a la altura del bolsillo del pantalón y dos antenas en la parte superior del portal. El equipo entregaba 1 W a la entrada de cada antena. Se compararon tarjetas duales vs simples puestas en el bolsillo lateral derecho del pantalón. Un solo participante atravesaba el portal en repetidas ocasiones utilizando dos tipos de pantalón: short suelto y jeans ajustado. El participante tomaba una de las tarjetas, atravesaba el portal, daba media vuelta y lo volvía a atravesar, dejaba la tarjeta y tomaba una nueva. Esta secuencia se repitió con 84 tarjetas simples y 77 tarjetas duales, usando pantalón suelto y ajustado. Los resultados de este experimento aparecen en la Tabla 3.1. Las antenas altas tienen buena lectura solamente al usar tarjetas simples y pantalón suelto, en los otros 3 casos todo el trabajo de detección es realizado por las antenas que están a la altura del bolsillo del pantalón. Además todas las tarjetas simples son leídas mientras que algunas de las duales no son detectadas.

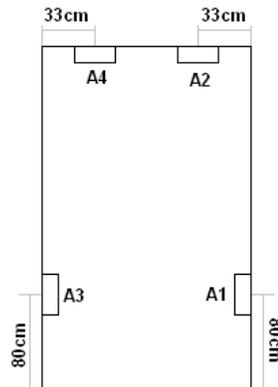


FIGURA 3.3. Posición antenas.

TABLA 3.1. Lecturas de tarjetas simples y duales, pantalón holgado y ajustado

Tarjeta	Pantalón	Detección	Lecturas por tag			
			Antenas bajas		Antenas altas	
			Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda
Simple	Holgado	100%	26,5	23,3	21,0	12,6
	Ajustado	100%	13,8	10,3	0,7	0
Dual	Holgado	82%	8,6	4,6	0,7	0,6
	Ajustado	86%	7,5	4,3	0	0

3.3.2. Tarjetas en mano, bolsillo, y mochila

La Sección 3.3.1 muestra que existe una variabilidad importante en el comportamiento del sistema al usar la tarjeta en el bolsillo aún cuando solamente se varía el tipo de pantalón y el tipo de tarjeta utilizados. Es por esto que se procedió a experimentar en forma más extensiva el desempeño que se obtiene al utilizar la tarjeta en otras posiciones. Usando la misma configuración de antenas, equipo y forma de caminar por el portal de la Sección 3.3.1 se probaron 10 tarjetas simples y 10 tarjetas duales localizadas en los siguientes lugares:

- (i) Tarjeta suelta en bolsillo trasero derecho del pantalón, ajustado
- (ii) Tarjeta sostenida con el dedo índice y pulgar a la altura de la cintura, del lado derecho.
- (iii) Tarjeta sostenida con el dedo índice y pulgar con el brazo colgando del lado derecho.
- (iv) Tarjeta sostenida con todos los dedos de la mano y con el brazo colgando del lado derecho.

- (v) Tarjeta sostenida con el dedo índice y pulgar con la mano a la altura de la cabeza del lado derecho.
- (vi) Tarjeta sostenida con todos los dedos de la mano y a la altura de la cabeza del lado derecho.
- (vii) Tarjeta suelta en la mochila, con la mochila puesta en la espalda.
- (viii) Tarjeta suelta en la mochila, con la mochila tomada en la mano, con el brazo colgando del lado derecho.
- (ix) Tarjeta suelta en la mochila, con la mochila puesta en el pecho.
- (x) Tarjeta suelta en la mochila, con la mochila sostenida bajo el brazo derecho, pegada al cuerpo.

Los resultados de estos experimentos aparecen en las Tablas 3.2 y 3.3. Aunque en porcentaje de detección muchas de las localizaciones de tarjetas resultaron en 100% para tarjetas simples y duales, al revisar los valores de lecturas/tag se aprecia que las tarjetas simples tienen un mejor comportamiento que sus pares duales.

En esta tesis se propone el uso de tarjetas duales para conteo e identificación de pasajeros, permitiendo mantener la forma de pago en los sistemas que actualmente se basan en Mifare. Dadas las diferencias en el porcentaje de lectura entre tarjetas duales y simples, en beneficio de las segundas, se decidió aplicar un set de experimentos usando ambas tarjetas. Lo anterior permite visualizar que desempeño se obtendría al mejorar el diseño de las tarjetas duales.

Según las Tablas 3.2 y 3.3, los mejores índices de lectura se obtienen al sostener la tarjeta solamente con dedos índice y pulgar, y al tener la tarjeta en la mochila. Por otro lado, tener la tarjeta en el bolsillo o sostenerla con toda la mano son los peores escenarios. Estas observaciones indican una variabilidad en la probabilidad de detección que merece ser calificada en experimentos estadísticamente representativos.

3.3.3. Encuesta: lugares más populares para llevar la tarjeta

En las secciones anteriores (3.3.1 3.3.2) se mostró que el lugar en que se lleva la tarjeta determina fuertemente la capacidad de su detección. Además, para algunos de esos lugares la posición de la antena debe ser estudiada con mayor atención. En un experimento masivo y estadísticamente significativo resulta difícil probar la misma cantidad de lugares que se estudiaron en la Sección 3.3.2. Para definir los experimentos a realizar, y por tanto, cual de las posiciones de antenas es la más adecuada se realizó una encuesta sobre la forma de

TABLA 3.2. Lecturas de tarjetas simples

Lugar	Detección	Lecturas por tag			
		Antenas bajas		Antenas altas	
		Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda
Bolsillo trasero derecho (i)	100%	7,6	2,5	0	0,1
Indice y pulgar altura cintura (ii)	100%	142,6	119,5	124,1	131,5
Indice y pulgar, brazo colgando (iii)	100%	122,9	95,8	110,4	94,4
Mano colgando (iv)	100%	7,3	4,7	0,2	0
Indice y pulgar altura cabeza (v)	100%	63,2	69,7	93,4	98,9
Mano altura cabeza (vi)	90%	0,3	0	16,6	8,6
Mochila a la espalda (vii)	100%	33,6	33,9	50,5	43,7
Mochila en mano colgando (viii)	100%	42,2	16,7	19,4	18,3
Mochila adelante (ix)	100%	52,0	59,2	27,6	22,3
Mochila bajo brazo derecho (x)	100%	44,6	39,5	9,7	10,9

TABLA 3.3. Lecturas de tarjetas duales

Lugar	Detección	Lecturas por tag			
		Antenas bajas		Antenas altas	
		Derecha	Izquierda	Derecha	Izquierda
Bolsillo trasero derecho (i)	20%	0,4	0	0,1	0
Indice y pulgar altura cintura (ii)	100%	33,4	26,6	28	17,7
Indice y pulgar, brazo colgando (iii)	100%	33,1	29,8	22,8	15,8
Mano colgando (iv)	90%	3,5	4,2	0	0
Indice y pulgar altura cabeza (v)	100%	12	8,7	31,5	33,6
Mano altura cabeza (vi)	40%	0	0	9,4	3,1
Mochila a la espalda (vii)	90%	9,5	14,7	12,8	13
Mochila en mano colgando (viii)	80%	15,7	6	5,6	2,9
Mochila adelante (ix)	100%	24,8	18,5	3,2	5,2
Mochila bajo brazo derecho (x)	100%	22,4	20,3	3,7	1,6

portar la tarjeta bip. La encuesta de la figura 3.4 se aplicó a 230 estudiantes universitarios¹. De esta encuesta se extrae que las formas más populares de portar la tarjeta corresponden a los siguientes casos:

- (i) Tarjeta en billetera dentro del bolsillo.
- (ii) Tarjeta en billetera en el bolso.
- (iii) Tarjeta suelta en el bolsillo.
- (iv) Tarjeta suelta en el bolso.

¹En los resultados no está representada la alternativa a) (No ando en micro / No tengo tarjeta bip) que resultó en un 10,8%.

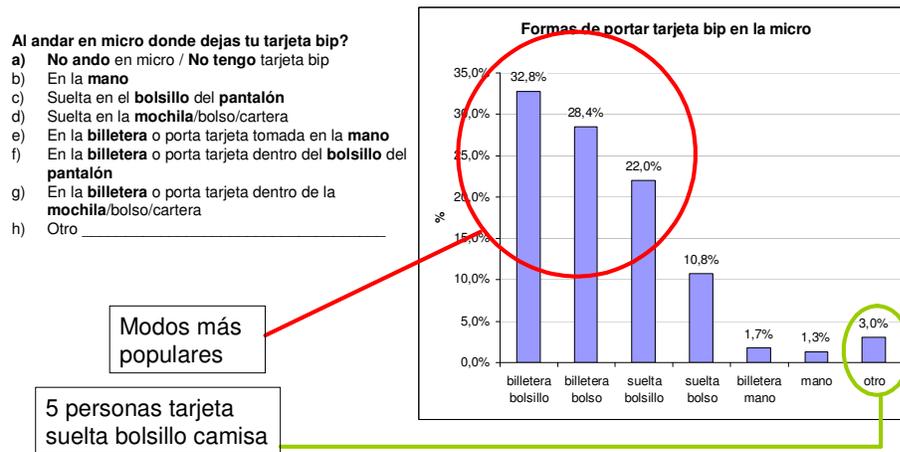


FIGURA 3.4. Resultados encuesta realizada sobre formas de llevar la tarjeta bip.

De las pruebas preliminares de las Secciones 3.3.1 3.3.2 se deduce que llevar la tarjeta en la billetera dentro del bolsillo (i) y llevar la tarjeta suelta en el bolsillo (iii) son los ambientes de lectura más complejos, por lo que ambos merecen ser calificados. Sin embargo, llevar la tarjeta en billetera dentro del bolso (ii) es muy similar a llevarla suelta en el bolso (iv), por lo que experimentar solo con una de estas modalidades es suficiente. Por otro lado, dado que al subir al bus los pasajeros deben acercar su tarjeta al validador, si se desea registrar la entrada de los pasajeros al sistema se hace necesario explorar el nivel de detección al llevar la tarjeta en la mano. Así, los resultados de las pruebas preliminares, la encuesta realizada y los requisitos del diseño definen para los experimentos masivos las siguientes modalidades:

- WB: Tarjeta en la billetera en la mochila (*Wallet Backpack*)
- WP: Tarjeta en la billetera en el bolsillo trasero derecho del pantalón (*Wallet Pocket*)
- LP: Tarjeta suelta en el bolsillo trasero derecho del pantalón (*Loose Pocket*)
- H: Tarjeta en la mano (*Hand*)

3.4. Efectos de la localización de antenas en la tasa de lectura

El segundo pasó para determinar el setup experimental, luego de conocer la localización de las tarjetas, es escoger la posición adecuada para las antenas en el portal. La forma de llevar la tarjeta más crítica es cuando esta dentro del bolsillo, ya sea suelta o dentro de

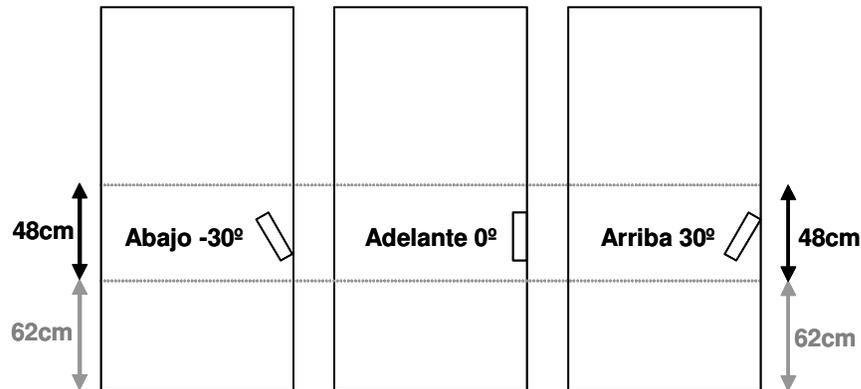


FIGURA 3.5. Variación en altura de la antena y diferentes ángulos

la billetera. Es por esto que se realizaron experimentos para encontrar la altura y ángulo óptimos para leer la tarjeta en esta localización.

Nuevamente, una sola persona tomaba una tarjeta dual, se la guardaba en el bolsillo trasero derecho del pantalón (con una altura de 70 cm), y atravesaba el portal ida y vuelta para luego cambiar la tarjeta testada. El proceso se repitió para 20 tarjetas duales. La lectura se realizaba utilizando una sola antena, colocada en el lado derecho del portal, variando su altura y ángulo (Fig 3.5). La Figura 3.6 muestra el porcentaje de detección vs. altura relativa de la antena sobre el bolsillo. La Figura 3.7 muestra las lecturas promedio por tag vs. altura relativa de la antena sobre el bolsillo. De los resultados no es claro cual es el ángulo más adecuado, sin embargo la antena apuntando hacia adelante entrega un porcentaje de detección más parejo por un mayor trecho. La antena hacia adelante también entrega buen nivel de lecturas promedio por tag. Por estos motivos y debido a que es el modo que obstaculiza menos el portal se escogió usar la antena apuntando hacia adelante (con 0° de inclinación) a una altura de 78 cm del suelo.

Se realizaron experimentos similares con tarjetas en mano derecha a la altura de la cabeza, y antenas en diferentes posiciones y ángulos en el techo del portal. Los resultados en ese caso no permiten inferir la posición adecuada de las antenas y se escogió colocar las dos antenas restantes a 132 cm del suelo, en ambos costados del portal, apuntando recto (0° de inclinación con respecto a la vertical).

Patrón de radiación de la antena: Cabe destacar que la elección de las posiciones de antena está ligada al patrón de radiación de la antena utilizada. Utilizar antenas con patrón de radiación diferente puede hacer variar las posiciones ideales de antenas. La antena

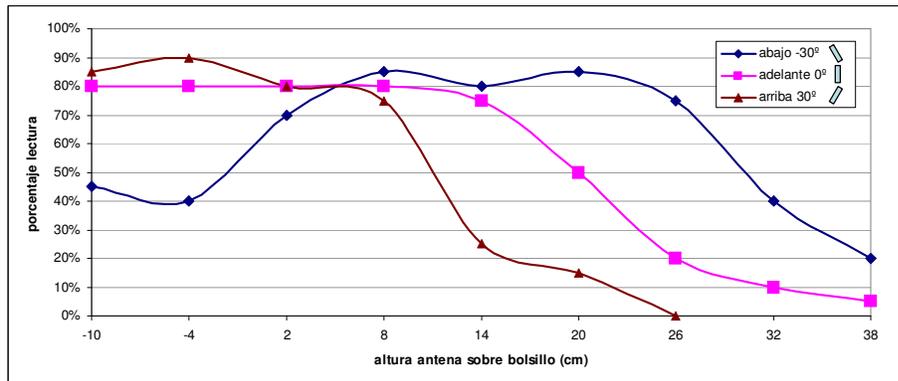


FIGURA 3.6. Porcentaje de lectura, tarjeta en el bolsillo trasero derecho, variando altura y ángulo de la antena

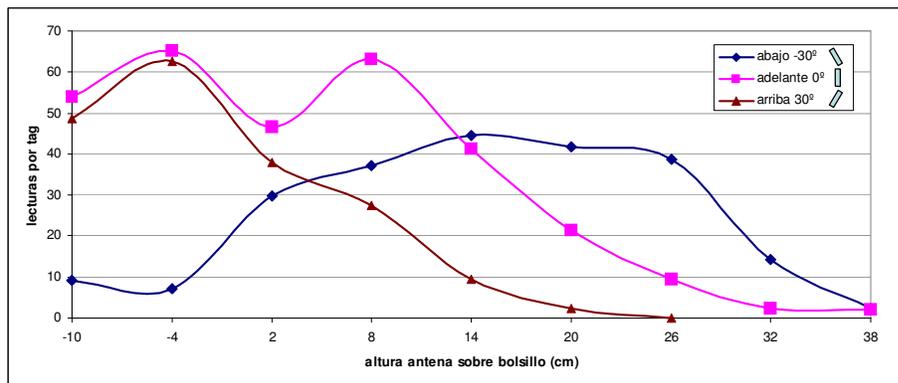


FIGURA 3.7. Lecturas promedio por tag, tarjeta en el bolsillo trasero derecho, variando altura y ángulo de la antena

utilizada (Poynting PATCH-A0025) tiene una apertura de unos 70° para los 3 dB y unos 100° para los 6 dB.

3.5. Valores de las variables controlables

Para comenzar la definición de los experimentos a realizar, se exponen los valores de las variables de control descritas al comienzo de este capítulo, resultado de los experimentos de laboratorio a menor escala presentados en la última sección.

- **Portal**

- Tamaño portal: 2,10 m de alto por 1,15 m de ancho.
- Número de antenas: 4
- Tipo de antenas: Polarización circular, apertura 60°, ganancia de 6.0 dBi.

- Ubicación de las antenas: 4 posiciones; Low 78cm del suelo y High. Antenas localizadas a ambos lados del portal.
- **Lector**
 - Selección de antenas: 1324
 - Potencia emitida por antena: 30,7 dB para cables de 3 m y 32,0 dB para cables de 8 m.
 - Modo anticolidión: $Q_{inicial} = 2$ y $Q_{maximo} = 15$.
 - Modo de lectura: alta densidad de datos, Sesión 1, Select command repeat period = 1.
- **Participantes**
 - Tipo de tarjeta: dual y simple.
 - Modo de portar tarjetas:
 - * En la billetera en el bolsillo trasero derecho del pantalón.
 - * En la billetera dentro de la mochila
 - * Tarjeta suelta en el bolsillo trasero derecho del pantalón.
 - * Tarjeta en la mano
 - Velocidad de caminata: media.
 - Filas: una fila y dos filas.

3.6. Descripción experimentos de identificación en portal

En el portal descrito en la Sección 3.1 se montaron 2 antenas Poynting modelo PATCH-A0025 (Poynting, 2008) en cada lado del portal a alturas de 78 cm y 132 cm del piso (Figura 3.8). Se utilizó el lector Sirit IN510 (Sirit, 2008) con cables coaxiales Altelicon modelo CA-240 (Altelicon, 2008), para conectar las antenas. El lector fue operado tal que la potencia a la entradas de las antenas sea 1 W. Se usaron las 40 tarjetas simples y 40 tarjetas duales, como las descritas en la Sección 3.1. Un resumen de las variables controlables y sus valores aparece en la Sección 3.5.

Para testear su sensibilidad, las 80 tarjetas fueron colgadas una a una en una bolsa plástica a 108 cm frente a una de las antenas, a 80 cm del suelo. Para cada tarjeta se registró la potencia mínima necesaria para ser leída. La medición se realizó incrementando la potencia de energización en pasos de 1 dB utilizando un software diseñado para tal efecto. Los resultados indican que existe una clara variabilidad en la sensibilidad de cada tarjeta para ser leída (Figura 3.9). En particular, se observa una importante diferencia en la

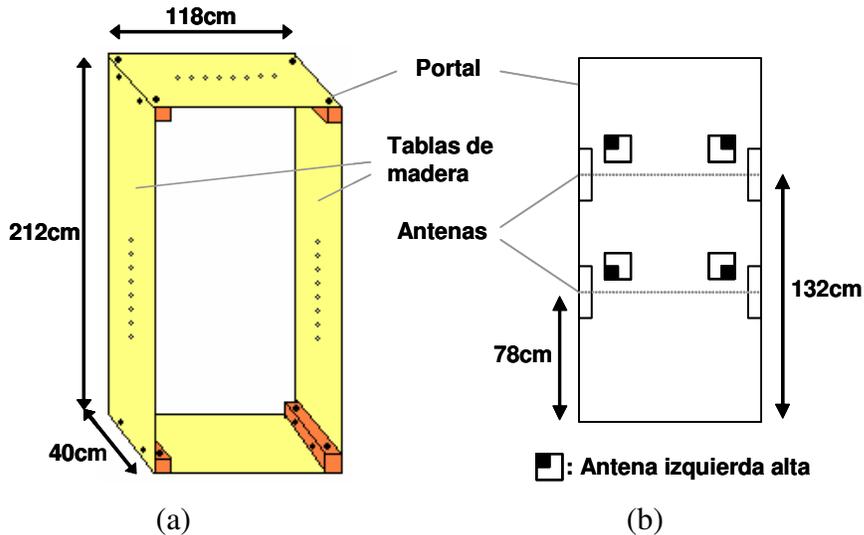


FIGURA 3.8. Maqueta de la puerta del bus. (a) Dimensiones puerta, (b) posición de las antenas.

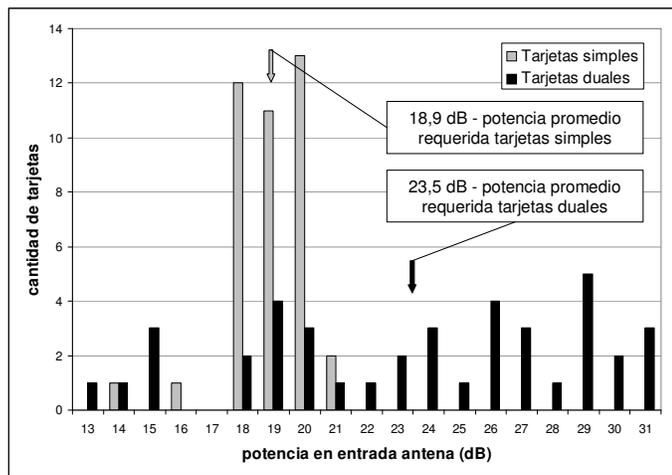


FIGURA 3.9. Potencia mínima necesaria para lectura exitosa de tarjetas simples y simples

sensibilidad de tarjetas dobles y simples: en promedio se necesitan 4,6 dB más de potencia para leer a las tarjetas dobles.

A cada uno de 40 voluntarios (19 hombres y 21 mujeres, en su mayoría estudiantes universitarios) se le entregaron dos tarjetas, una dual (marcada con negro) y una simple (marcada con rojo). En una sala de tamaño mediano², con puertas de salida en lados opuestos (Figura 3.10), se ubicó el portal (Figura 3.1) en una de las dos puertas. Se le indicó a

²Sala E-14 Construcción Civil, Campus San Joaquín, PUC.

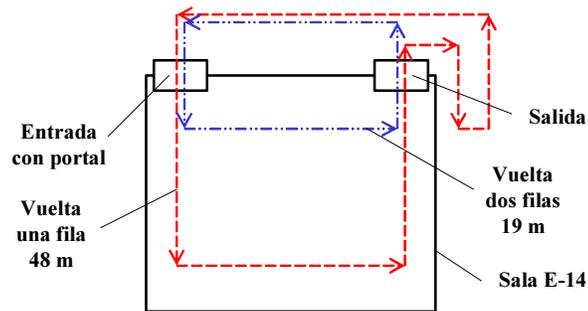


FIGURA 3.10. Mapa sala E-14

los voluntarios caminaran en fila entrando por la puerta del portal y saliendo por la otra puerta, realizando de esta forma 5 vueltas (= 1 serie). Para cada serie se definió una tarjeta “principal” (dual o simple) y una “localización” para ella. Las localizaciones fueron:

- WB: Tarjeta en la billetera en la mochila
- WP: Tarjeta en la billetera en el bolsillo trasero derecho del pantalón
- LP: Tarjeta suelta en el bolsillo trasero derecho del pantalón

La otra tarjeta (“secundaria”) debía ser portada en la mano. Así, los datos recopilados para localización de tag en la mano constan de 600 pasadas por el portal (40 personas x 5 vueltas por serie), y todas las mediciones en que el tag estaba en la mochila o en el bolsillo consisten de 200 pasadas por el portal (40 personas x 5 vueltas).

Lo anterior fue repetido para 2 formas de caminar:

- Una fila: Las cuarenta personas caminaban en una fila, por un circuito de unos 48 m (Figura 3.10), a velocidad media.
- Dos filas: Las cuarenta personas caminaban en dos filas, en parejas, por un circuito de 19 m (Figura 3.10), a velocidad media.

Adicionalmente, a cada participante se le midió la altura del punto más bajo de su bolsillo trasero del pantalón con respecto al suelo.

Los datos de cada serie se obtuvieron usando activamente las 4 antenas, lo que el lector Sirit realiza multiplexando la potencia entre las antenas a una tasa promedio de 7.5 ms por antena (Figura E.3), 133 cambios de antena por segundo. Porcentajes de detección individuales por antena, o por combinaciones de 2 antenas (6 combinaciones), 3 antenas (4 combinaciones) o con las 4 antenas juntas fueron obtenidas filtrando los datos a posteriori.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Resultados generales, conteo e identificación en portal

Los porcentajes de detección obtenidos en todos los experimentos realizados se presentan en las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4. Las celdas destacadas en negrita corresponden a la mejor alternativa entre todas aquellas con el mismo número de antenas. En lo que sigue, se analiza detalladamente el desempeño en función de la forma de llevar la tarjeta, se estudia el efecto de proximidad entre tarjeta y antena, se compara el desempeño de tarjetas duales vs. simples, y se estudia el efecto del número de antenas sobre el porcentaje de detección. En en los Anexos H, I, J y K se tienen los resultados completos del experimento, tabulados y agrupados en todas las combinaciones necesarias para obtener los datos presentados en esta sección.

TABLA 4.1. Resultados tarjetas duales, una fila - Porcentaje de detección

Ant	Tarjetas duales - Una fila			
	WB	WP	LP	H
☐	86% ±4,9%	7% ±3,6%	3% ±2,4%	31%±3,8%
☐	76% ±6%	3% ±2,4%	3% ±2,4%	32%±3,8%
☐	83% ±5,3%	18% ±5,4%	7% ±3,6%	71% ±3,7%
* ☐	71% ±6,4%	78% ±5,9%	64% ±6,8%	81% ±3,2%
☐	93% ±3,6%	8% ±3,8%	4% ±2,8%	42% ±4%
☐	94% ±3,4%	18% ±5,4%	7% ±3,6%	74% ±3,6%
☐	94% ±3,4%	18% ±5,4%	8% ±3,8%	75% ±3,5%
☐	91% ±4%	78% ±5,9%	64% ±6,8%	83% ±3,1%
☐	87% ±4,8%	78% ±5,9%	64% ±6,8%	82% ±3,1%
* ☐	88% ±4,6%	78% ±5,9%	65% ±6,7%	96% ±1,6%
☐	97% ±2,4%	18% ±5,4%	8% ±3,8%	76% ±3,5%
☐	94% ±3,4%	78% ±5,9%	64% ±6,8%	83% ±3,1%
☐	95% ±3,1%	78% ±5,9%	65% ±6,7%	97% ±1,4%
* ☐	94% ±3,4%	78% ±5,9%	65% ±6,7%	97% ±1,4%
☐	97% ±2,4%	78% ±5,9%	65% ±6,7%	97% ±1,4%

Al caminar en una fila la velocidad promedio fue de $0.93 \frac{m}{s}$, la tasa promedio de personas pasando por el portal fue $0.80 \frac{pax}{s}$ y la separación con la persona de adelante fue de unos 116 cm. Al caminar en dos filas esas estadísticas fueron: $0.62 \frac{m}{s}$, $1.37 \frac{pax}{s}$ y aproximadamente 91 cm de separación con la persona de adelante. El mayor atochamiento, en dos filas, reduce la velocidad de caminata.

TABLA 4.2. Resultados tarjetas duales, dos filas - Porcentaje de detección

Ant	Tarjetas duales - Dos filas			
	WB	WP	LP	H
☐	67% ±6,6%	3% ±2,4%	2% ±2,0%	26% ±3,6%
☐	83% ±5,3%	6% ±3,4%	0% ±0,0%	24% ±3,5%
☐	65% ±6,7%	14% ±4,9%	15% ±5,0%	66% ±3,9%
* ☐	83% ±5,3%	72% ±6,3%	67% ±6,6%	69% ±3,8%
☐	91% ±4,0%	6% ±3,4%	2% ±2,0%	33% ±3,8%
☐	75% ±6,1%	15% ±5,0%	15% ±5,0%	69% ±3,8%
☐	90% ±4,2%	16% ±5,2%	15% ±5,0%	68% ±3,8%
☐	94% ±3,4%	72% ±6,3%	67% ±6,6%	73% ±3,6%
☐	92% ±3,8%	72% ±6,3%	67% ±6,6%	70% ±3,7%
* ☐	92% ±3,8%	76% ±6,0%	70% ±6,5%	89% ±2,6%
☐	91% ±4,0%	16% ±5,2%	15% ±5,0%	70% ±3,7%
☐	97% ±2,4%	72% ±6,3%	67% ±6,6%	73% ±3,6%
☐	95% ±3,1%	76% ±6,0%	70% ±6,5%	90% ±2,4%
* ☐	94% ±3,4%	76% ±6,0%	70% ±6,5%	90% ±2,4%
☐	97% ±2,4%	76% ±6,0%	70% ±6,5%	91% ±2,3%

4.2. Análisis por localización de la tarjeta

4.2.1. Tarjetas en la mano (H)

Al llevar las tarjetas en la mano el porcentaje de detección es alto, superior al 90% al usar 4 antenas (☐). Las tarjetas tienen buena exposición a las antenas, la obstrucción producida por dedos o una mano es pequeña. Todas las tarjetas usadas (duales y simples) se leen a un metro en condiciones óptimas (Figura 3.9). Es por este motivo que no existe una diferencia importante en el porcentaje de detección entre tarjetas duales y simples al usar 2 o más antenas, puesto que en tales casos siempre hay una antena a menos de un metro con línea de vista a la tarjeta.

Los participantes tendían a caminar con los brazos colgando y es por esto que las antenas bajas (☐ y ☐) son las que tienen el mayor porcentaje de detección.

Existe una disminución de hasta 11% en el porcentaje de detección al tener gente caminando en dos filas. Ello se debe a las obstrucciones de línea de vista antena-tag, inherentes a una mayor densidad de personas pasando por el portal. Esta diferencia es mayor para las tarjetas duales. Sin embargo, al usar dos o más antenas se acota a 7%. El uso de una antena zenital podría ser una solución viable para estos casos.

TABLA 4.3. Resultados tarjetas simples, una fila - Porcentaje de detección

Ant	Tarjetas simples - Una fila			
	WB	WP	LP	H
☐	89% ±4,4%	12% ±4,6%	25% ±6,1%	61% ±4,0%
☐	85% ±5,0%	13% ±4,8%	17% ±5,3%	56% ±4,1%
☐	81% ±5,5%	32% ±6,6%	44% ±7,0%	84% ±3,0%
* ☐	80% ±5,7%	92% ±3,8%	97% ±2,4%	92% ±2,2%
☐	91% ±4,0%	17% ±5,3%	31% ±6,5%	72% ±3,7%
☐	89% ±4,4%	32% ±6,6%	46% ±7,0%	87% ±2,7%
☐	88% ±4,6%	33% ±6,6%	47% ±7,1%	87% ±2,7%
☐	92% ±3,8%	92% ±3,8%	97% ±2,4%	94% ±1,9%
☐	90% ±4,2%	92% ±3,8%	97% ±2,4%	93% ±2,1%
* ☐	85% ±5,0%	93% ±3,6%	98% ±2,0%	98% ±1,1%
☐	91% ±4,0%	33% ±6,6%	49% ±7,1%	90% ±2,4%
☐	93% ±3,6%	92% ±3,8%	97% ±2,4%	94% ±1,9%
☐	90% ±4,2%	93% ±3,6%	98% ±2,0%	99% ±0,8%
* ☐	92% ±3,8%	93% ±3,6%	98% ±2,0%	99% ±0,8%
☐	93% ±3,6%	93% ±3,6%	98% ±2,0%	99% ±0,8%

4.2.2. Tarjetas en la billetera, dentro de la mochila (WB)

Este es el caso en que las tarjetas duales y simples tienen el comportamiento más similar. En algunas ocasiones el porcentaje de detección de las tarjetas duales supera a las simples, pero nunca en más de 6% (comparar columnas WB, Tablas 4.1 y 4.3, antenas ☐).

Esta es la forma de portar las tarjetas menos sensible a localización de antenas, todas las antenas entregan porcentaje de detección que no difiere en más de 15% y 9% para tarjetas duales y simples. En el 80% de los casos WB, el porcentaje de lectura es 83% o mayor con tarjetas duales, y 85% o superior con tarjetas simples. Usar las 4 antenas resulta en desempeños sobre el 93%, independiente del número de filas y tipo de tarjeta.

Esta es una forma de portar la tarjeta en que no es claro si existe un incremento o una disminución en el porcentaje de detección al pasar de una a dos filas.

4.2.3. Tarjetas en el bolsillo trasero del pantalón (WP y LP)

En comparación a WB y H, la cercanía de la tarjeta al cuerpo humano limita fuertemente su rango de lectura. El uso de billetera en este caso puede tener efectos positivos y negativos sobre el porcentaje de detección de la tarjeta. Por un lado la billetera mantiene a la tarjeta alejada del cuerpo en algunos milímetros, pero por otro lado la billetera puede contener monedas que obstaculicen la lectura de la tarjeta.

TABLA 4.4. Resultados tarjetas simples, dos filas - Porcentaje de detection

Ant	Tarjetas simples - Dos filas			
	WB	WP	LP	H
☐	89% ±4,4%	7% ±3,6%	15% ±5,0%	54% ±4,1%
☐	87% ±4,8%	9% ±4,0%	21% ±5,8%	51% ±4,1%
☐	77% ±6,0%	25% ±6,1%	36% ±6,8%	82% ±3,1%
* ☐	82% ±5,4%	80% ±5,7%	82% ±5,4%	86% ±2,8%
☐	94% ±3,4%	11% ±4,4%	28% ±6,3%	64% ±3,9%
☐	91% ±4,0%	26% ±6,2%	38% ±6,9%	85% ±2,9%
☐	90% ±4,2%	27% ±6,3%	40% ±6,9%	86% ±2,8%
☐	95% ±3,1%	81% ±5,5%	83% ±5,3%	89% ±2,6%
☐	91% ±4,0%	80% ±5,7%	83% ±5,3%	88% ±2,7%
* ☐	89% ±4,4%	85% ±5,0%	84% ±5,2%	94% ±1,9%
☐	94% ±3,4%	28% ±6,3%	41% ±7,0%	87% ±2,7%
☐	96% ±2,8%	81% ±5,5%	83% ±5,3%	90% ±2,4%
☐	94% ±3,4%	85% ±5,0%	84% ±5,2%	95% ±1,8%
* ☐	95% ±3,1%	85% ±5,0%	84% ±5,2%	95% ±1,8%
☐	96% ±2,8%	85% ±5,0%	85% ±5,0%	95% ±1,8%

Revisando las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se observa que usar billetera mejora el porcentaje de detección de las tarjetas duales en promedio 7.1% (Tablas 4.1 y 4.2, promediando los 30 valores WP vs. promedio de los 30 valores LP), mientras que en las tarjetas simples ocurre lo contrario; el porcentaje de detección disminuye en 7.3% al usar billetera (Tablas 4.3 y 4.4, promedio de 30 valores WP vs. promedio de 30 valores LP).

Al caminar en una fila, los participantes pasaban por el medio del portal, exponiendo un tag localizado en el bolsillo trasero derecho del pantalón a aproximadamente 45 cm de la antena ☐ y aproximadamente 65 cm de la antena ☐. Los resultados de los experimentos con dos filas de personas se pueden descomponer, en cambio, entre los participantes que caminaron por la fila derecha y los que lo hicieron por la izquierda. Al caminar por la fila derecha, la tarjeta quedaba expuesta a aproximadamente 10-15 cm de la antena ☐ y 85-90 cm de la antena ☐. En este caso, la lectura sufría de una obstrucción parcial de la señal por parte del compañero de la fila izquierda. Al caminar por la fila izquierda la tarjeta del participante pasaba a unos 65-70 cm de la antena ☐ (en este caso con una obstrucción parcial de la señal por parte de su compañero de la fila derecha) y a unos 30-35 cm de la antena ☐. Los datos que se presentan en Tabla 4.5 muestran el efecto de la distancia sobre el porcentaje de lectura. Se observa que en WP y LP la antena ☐ siempre lee más que la antena ☐, y que es preferible tener la antena del lado en que se encuentra el tag aunque la

persona esté más lejos de la antena. Al tener la tarjeta en la mano, las lecturas a distancias cercanas y medianas de la antena son muy parecidas. En cambio, a distancias lejanas hay un efecto importante en las tarjetas duales, pérdidas de 20% y 23% con antenas \square y \square , y un efecto leve en las simples 8% y 5% con antenas \square y \square . Las distancias anotadas en la Tabla 4.5 son validas para WP y LP, en el caso H la distancia efectiva está entre los mismos rangos para \square y \square pero independiente de la antena analizada.

TABLA 4.5. Porcentaje de detección vs. distancia de la antena, (WP, LP y H)

Ant	Distancia	Duales			Simples		
		WP	LP	H	WP	LP	H
\square	10-15cm	96%	96%	78%	100%	98%	89%
	45cm	78%	64%	81%	92%	97%	92%
	65-70cm	48%	37%	60%	60%	66%	83%
\square	30-35cm	22%	24%	79%	38%	41%	85%
	65cm	18%	7%	71%	32%	44%	84%
	85-90	5%	6%	52%	11%	31%	80%

La Tabla 4.6 muestra, separados por género, los porcentajes de detección de las modalidades en que la tarjeta está en el bolsillo y en la mano, al caminar en una fila. Al tener la tarjeta en el bolsillo las diferencias en el porcentaje de detección entre hombres y mujeres son significativas: para tarjetas duales $\Delta WP = 22\%$ y $\Delta LP = 29\%$, mientras que en las simples $\Delta WP = 2\%$ y $\Delta LP = 6\%$, en todos los casos la ventaja es para los hombres. Una posible explicación es que en esta forma de portar la tarjeta la detectabilidad del tag está asociada a qué tan ajustados son los pantalones del pasajero. Mientras más ajustados, más cercana está la tarjeta al cuerpo y por lo tanto peor será su desempeño. Generalmente las mujeres utilizan pantalones más ajustados que los hombres, por lo que su desempeño en estas condiciones debería ser peor. No obstante, esto no explica la diferencia claramente mayor observada en el caso de tarjetas duales con respecto a las simples. En comparación, al llevar la tarjeta en la mano hay diferencias menores a 5% entre hombres y mujeres, lo que indica que no hay sesgos evidentes en las sensibilidades de las tarjetas utilizadas y valida, en parte, las observaciones anteriores. En todo caso, las diferencias observadas por género requieren de más investigación para ser explicadas.

Una variable adicional que se midió fue el efecto en la detectabilidad del tag de la altura del bolsillo del participante con respecto a la altura de la antena. Las lecturas se pueden agrupar en 3 grupos, según la altura de su bolsillo:

- Bajo: 62-72 cm, 13 personas; 6 hombres y 7 mujeres

TABLA 4.6. Porcentaje de detección por género (WP, LP y H, una fila, antena derecha baja)

Género	Duales			Simples		
	WP	LP	H	WP	LP	H
Hombres	90%	80%	83%	93%	100%	93%
Mujeres	68%	51%	78%	91%	94%	91%

- Medio: 72-75 cm, 13 personas; 6 hombres y 7 mujeres
- Alto: 76-80 cm, 14 personas; 7 hombres y 7 mujeres

Los porcentajes de detección al tener la tarjeta en el bolsillo, caminar en una fila y usar la antena □, separados en los 3 grupos anteriores se presentan en la Tabla 4.7. La diferencia más importante en el porcentaje de detección se da al usar tarjetas duales y tener la tarjeta en la billetera dentro del bolsillo; los grupos Bajo y Medio son superiores al Alto en 16% y 22%. Al usar tarjetas simples y tenerlas en la billetera dentro del bolsillo el grupo Bajo supera al Medio y Alto en 9% y 13% respectivamente. Se concluye que el porcentaje de detección al tener la tarjeta suelta en el bolsillo no se ve afectado por la altura del bolsillo, pero sí lo hace al tener la tarjeta en la billetera dentro del bolsillo, especialmente con tarjetas duales. Los motivos de esto deben ser investigados más a fondo. Los valores en el caso de tarjeta en la mano no muestran diferencias relevantes con respecto a la altura. Ello confirma que las diferencias encontradas no se deben a variabilidad en las calidades de las tarjetas en beneficio de alguno de los grupos.

TABLA 4.7. Porcentaje de detección vs. altura bolsillo (WP, LP y H, una fila, antenas bajas)

Altura Bolsillo	Duales			Simples		
	WP	LP	H	WP	LP	H
Bajo, 62-72cm	88%	62%	97%	100%	97%	100%
Medio, 72-75cm	82%	68%	96%	91%	100%	98%
Alto, 76-80cm	66%	64%	94%	87%	96%	97%

4.3. Número de antenas a usar

Los casos marcados con * en las Tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 representan las configuraciones ideales con 1, 2, 3 y 4 antenas para los modos WP, LP y H (no WB). Para estos casos analizamos la mejoría que se logra en porcentaje de detección con cada antena adicional (Tabla 4.8). La tabla indica la última antena agregada que entrega más de un 10%, 5%

y 2% , respectivamente, de incremento en el porcentaje de detección. Por ejemplo, con tarjetas duales en una fila, al tener la tarjeta en la billetera dentro de la mochila se tabula 2 / 3 / 4. Esto indica que la 2^a antena entrega más de un 10%, la 3^a antena entrega más de un 5% pero menos de un 10% y la 4^a antena entrega más de un 2% pero menos que un 5%. En la tabla se observa que un incremento en el porcentaje de detección de 10% o más, en todos los casos se resuelve con máximo 2 antenas. Es claro que el rendimiento de antenas adicionales es decreciente y que en la mayoría de los casos las antenas 3 y 4 mejoran la lectura en menos que 2%.

TABLA 4.8. Incremento de desempeño al agregar antenas, +10%/ + 5%/ + 2%

	Duales		Simples	
	Una fila	Dos filas	Una fila	Dos filas
WB	2 / 3 / 4	1 / 2 / 4	1 / 3 / 3	1 / 2 / 3
WP	1 / 1 / 1	1 / 1 / 2	1 / 1 / 1	1 / 2 / 2
LP	1 / 1 / 1	1 / 1 / 2	1 / 1 / 1	1 / 1 / 1
H	2 / 2 / 2	2 / 2 / 2	1 / 2 / 2	1 / 2 / 2

En cuanto al número de antenas y su localización, si el tag está en el bolsillo trasero derecho, la antena adecuada es la \square , y agregar \square no aporta en porcentaje de detección. Al tener dos filas, con el tag en la misma condición, la antena más adecuada sigue siendo \square y esta vez existe un aporte de entre 2% y 5% de la antena localizada al mismo nivel del lado opuesto (antena \square). Estas observaciones son válidas tanto para tarjetas duales como simples.

La sensibilidad del porcentaje de detección al tener la tarjeta en el bolsillo indica que formas adicionales de portar la tarjeta deberían ser investigadas, afinando la disposición y altura de las antenas.

Finalmente, es claro que las tarjetas duales presentan un rendimiento inferior a las simples lo que indica algún tipo de incompatibilidad entre tags Mifare y EPC Gen 2. Ello sugiere la necesidad de investigar sobre layouts más compatibles, o estudiar el uso de tags semi-pasivos EPC Gen 2 (PowerID, 2008).

4.4. Errores de lectura

El algoritmo slotted-aloha utilizado siempre presenta algún nivel de colisiones en los datos, el experimento no fue la excepción. Sin embargo no existe una correlación entre el nivel de detección y la cantidad de colisiones. Un indicador que tuvo mayor densidad

en los datos recogidos fue el “bad data”, este se debe a interrupciones en la señal recibida desde los tags y se debe a la lectura en ambientes complejos para señales UHF; efecto multirayectoria, obstrucciones y cercanía del cuerpo humano. Tampoco se encontró una relación directa entre el “bad data” y el porcentaje de detección obtenido.

4.5. Simulación de resultados

Los experimentos realizados entregan datos con un nivel de detalle importante. Es posible filtrar estos datos por diferentes categorías:

- Género: masculino o femenino
- Distancia de la antena a la que pasa la persona, dependiendo de si camina por: fila derecha, medio o fila izquierda
- Tipo de tarjeta utilizada: dual o simple
- Lugar en que guarda la tarjeta: mano, bolsillo con o sin billetera o en la mochila
- Cantidad de antenas y su localización en el portal: cualquiera de las combinaciones de 1, 2, 3 o 4 antenas evaluadas

Por ejemplo al elegir la combinación: mujeres, dos filas¹, tarjeta dentro de la billetera en el bolsillo, tarjetas duales y antena , obtenemos el histograma de la Figura 4.1. En ella se muestra la distribución de los porcentajes de detección para pasajeros circulando en la modalidad escogida. Este nivel de detalle permite reproducir las estadísticas computacionalmente.

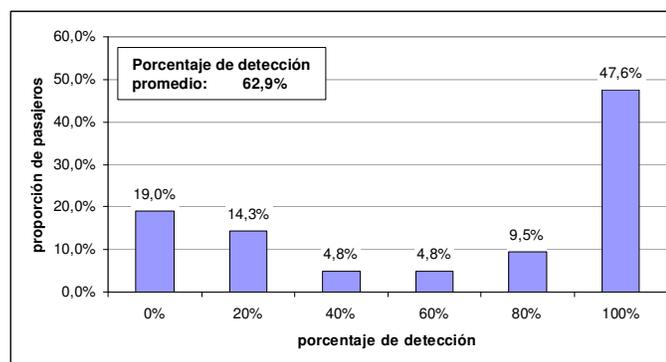


FIGURA 4.1. Histograma para un caso en particular

¹Sin distinción de izquierda y derecha.

Basándose en los datos experimentales, cada vez que se quiera asignar una estadística de detección para un pasajero se deberá utilizar una pequeña aplicación operando según la siguiente descripción. Considerando que existe una base de datos conteniendo los histogramas para todos los casos posibles, se deberá escoger uno de ellos especificando: combinación de antenas, género del usuario, localización de la tarjeta y posición en la fila. Luego, decidiendo al azar, se deberá extraer del histograma la una de las probabilidades de detección de pasajero y asignarla al pasajero generado (probabilidad de detección p) (Figura 4.2). Así, dado que la probabilidad de detección de un pasajero sigue la distribución Bernoulli(p), cada vez que se quiera obtener una estadística para dicho pasajero se deberá generar un número aleatorio y compararlo con la probabilidad de detección, decidiendo si en este caso la detección fue exitosa o fracasó (Figura 4.3).

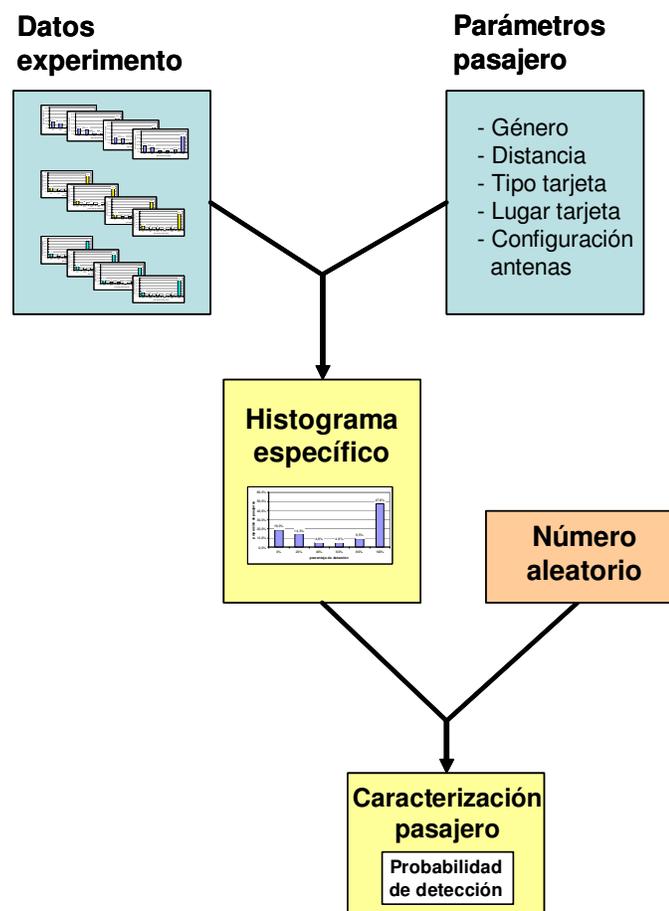


FIGURA 4.2. Generación de estadística de detección por pasajero

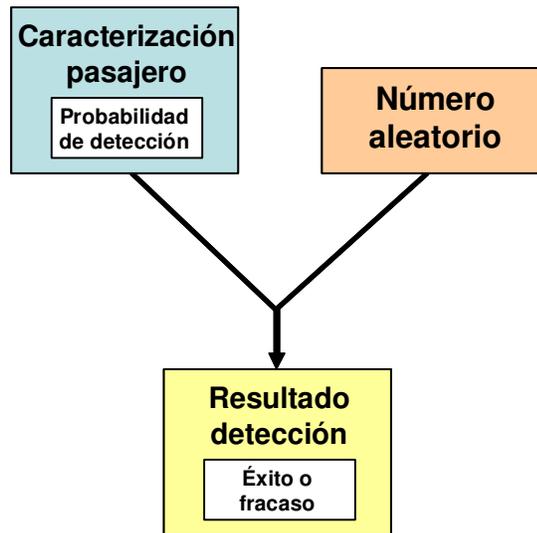


FIGURA 4.3. Simulación del conteo de un pasajero al pasar por el portal

A continuación se muestra un ejemplo de cálculo de detección para un pasajero, utilizando datos del experimento realizado. Los datos contenidos en las Tablas L.1 y L.2, entregan detalles por tarjeta y participante de los resultados del experimento: tarjetas duales guardadas en el bolsillo trasero derecho del pantalón, con dos filas de personas pasando por el portal. Es así como al filtrar por mujeres, en las dos filas y antena se tiene que de un total de 21 mujeres participantes:

- 4 de ellas no se detectaron en ninguna vuelta. Dando una probabilidad de detección de 0% al 19,0% de las mujeres de este experimento.
- 3 de ellas se detectaron en 1 vuelta de un total de 5. Dando una probabilidad de detección de 20% al 14,3% de las mujeres de este experimento.
- 1 de ellas se detecto en 2 vueltas de un total de 5. Dando una probabilidad de detección de 40% al 4,8% de las mujeres de este experimento.
- 1 de ellas se detecto en 3 vueltas de un total de 5. Dando una probabilidad de detección de 60% al 4,8% de las mujeres de este experimento.
- 2 de ellas se detectaron en 4 vueltas de un total de 5. Dando una probabilidad de detección de 80% al 9,5% de las mujeres de este experimento.
- 10 de ellas se detectaron en cada una de las 5 vueltas. Dando una probabilidad de detección de 100% al 47,6% de las mujeres de este experimento.

Los números registrados en la lista anterior corresponden exactamente a los presentados en el histograma de la Figura 4.1. Ahora, supongamos que se desea simular la probabilidad de detección para una mujer en este mismo escenario. Para lograr aquello, se debe generar un número aleatorio² y asignarle a esa mujer alguna de las probabilidades de detección mencionadas (0%, 20%, 40%, 60%, 80% o 100%). Por ejemplo si se genera un número aleatorio entre 0% y 100% resultando en 48% y luego se compara con la distribución acumulada del histograma (Tabla 4.9), a dicha mujer se le asigna una probabilidad de detección de 80%.

TABLA 4.9. Probabilidad acumulada para un caso en particular

Probabilidad de detección	Porcentaje de la población	Porcentaje acumulado de la población	Rango de población
0%	19,0%	19,0%	0% - 19,0%
20%	14,3%	33,3%	19,0% - 33,3%
40%	4,8%	38,1%	33,3% - 38,1%
60%	4,8%	42,9%	38,1% - 42,9%
80%	9,5%	52,4%	42,9% - 52,4%
100%	47,6%	100,0%	52,4% - 100,0%

Teniendo la probabilidad de detección asociada a la mujer, cada vez que se quiera generar una estadística de detección se debe obtener un número aleatorio y compararlo con esta probabilidad, tal como se realiza en cualquier experimento Bernoulli. La detección se da si el número aleatorio generado es inferior a la probabilidad de detección de la mujer. La no detección se da en caso que el número aleatorio generado sea mayor a la probabilidad de detección de la mujer. A modo de ejemplo, si la probabilidad de detección de la mujer simulada es de 80% y el número aleatorio generado entre 0% y 100% resultó en 25% la mujer ha sido detectada. Si al generar un nuevo número aleatorio este resulta 92% la mujer no ha sido detectada.

El procedimiento descrito se debe aplicar a cada uno de los pasajeros que se deseen simular; comenzando con la asignación de probabilidades de detección para cada uno de ellos y luego calculando la detección (éxito o fracaso) cada vez que sea necesario.

Los datos presentados en las Tablas L.1 y L.2 fueron obtenidos procesando los archivos de registro generados por el lector Sirit IN510 para cada uno de los experimentos. En el Anexo L, se presentan datos de dichos archivos de registro junto con una memoria de

²La mayoría de los lenguajes de programación incluyen generadores de números aleatorios.

calculo que explica de que manera fueron extraídos para generar las estadísticas presentadas. Adicionalmente, en un DVD adjunto a esta tesis se encuentran tablas similares a las Tablas L.1 y L.2 para cada uno de los experimentos realizados, así como la totalidad de los histogramas necesarios para reproducir la estadística de cada uno de los experimentos realizados mediante el proceso de simulación descrito en esta sección.

5. TRABAJO FUTURO Y CONCLUSIONES

5.1. Revisión de los resultados y comentarios generales

La investigación muestra que el uso de tarjetas simples EPC Gen 2 y un portal de 4 antenas tiene un desempeño comparable al de sistemas de conteo de pasajeros comerciales, especialmente al tener una sola fila de pasajeros pasando por el portal. El caso de tarjetas duales —compuestas por tags Mifare y un tag EPC Gen 2 embebidos en una misma tarjeta— no alcanza para competir con dichos sistemas, por lo que se sugiere investigar formas de mejorar el producto.

El análisis detallado de los resultados conduce a las siguientes conclusiones:

- El rendimiento de las tarjetas duales es inferior al de las tarjetas simples. Esto sugiere que los tags ISO 14443 interfieren con los tags EPC Gen2 y que embeber ambos en una misma tarjeta requiere de un diseño cuidadoso.
- A pesar de lo anterior, la configuración de antenas de mejor rendimiento es siempre la misma para tarjetas simples y duales. La configuración óptima para dos antenas se obtiene al colocar una a cada lado del portal, a 78 cm del piso, y el porcentaje de detección promedio resulta ser 91% para tarjetas simples y 82% para duales.
- El uso de más de dos antenas no mejora el rendimiento de tarjetas simples o duales llevadas en la mano o en el bolsillo —ya sea sueltas o en la billetera.
- Al pasar de una fila a dos filas, las tarjetas simples sufren un deterioro del orden de 10% en el porcentaje de detección al tener la tarjeta en el bolsillo. Por el contrario las tarjetas duales no presentan cambios significativos.
- La posición de la antena lectora respecto de la ubicación del tag, y su patrón de radiación son aspectos críticos. El uso de antenas con patrón de radiación adecuado, así como buenas estadísticas sobre el lugar donde la gente lleva sus tarjetas son elementos clave para lograr un rendimiento aceptable.

La implementación de esta solución al conteo e identificación de pasajeros en un sistema de transportes público como Transantiago debe tener en cuenta la posibilidad de que pasajeros ingresen al bus sin pagar, abordando por alguna de las puertas traseras. Además pasajeros que se acercan la puerta del bus detenido sin abordar a él no deberían ser contabilizados. Por lo tanto, se propone que la parte EPC Gen 2 de la tarjeta opere con un número de identificación variable. El actual validador debería ser modificado para incluir además

un pequeño lector/grabador UHF EPC Gen 2, de tal manera que al acercar la tarjeta para realizar un pago este lector pueda modificar la identificación. El número de identificación que se grabará contendrá el número de patente del bus, la fecha del día y el número correlativo de pasajero del día. De esta forma, lecturas que entreguen una patente diferente o fecha errónea entregarán mayor información sobre el pasajero. Existen 3 alternativas:

- El pasajero a subido sin pagar.
- El pasajero se ha detectado por estar cerca de la puerta, pero no ha subido.
- El pasajero porta más de una tarjeta, la tarjeta detectada no es utilizada regularmente.

Al detectar en una segunda ocasión, estando en otro paradero, una identificación no válida se considerará que el pasajero detectado no ha pagado su pasaje. Si luego de terminado el recorrido no se ha detectado nuevamente una identificación inválida se considerará que ese pasajero fue una lectura casual, por estar cerca de la puerta.

Dado que el número EPC Gen 2 contiene la fecha de la última utilización del sistema, es posible definir un período luego del cual una tarjeta se considera sin uso. Así, los datos capturados de pasajeros que portan más de una tarjeta pueden ser depurados en tiempo real, reduciendo el error de conteo.

No existirá problema al querer identificar el número EPC Gen 2 con el ID Mifare, dado que cada validador será capaz de almacenar la transacción de pago Mifare junto al nuevo número EPC Gen 2 asignado.

Claramente los aspectos de implementación mencionados deben ser sometidos a posteriores revisiones y experimentos.

5.2. Temas de investigación futura

Temas principales:

- Diseñar una tarjeta dual Mifare + EPC Gen 2 que presente desempeños cercanos a las tarjetas simples EPC Gen 2, reduciendo la interferencia entre ambos tags.
- Análisis de factibilidad del reemplazo de Mifare por ISO 15693 para transacciones de pago seguras en un sistema de transporte público.
- Dado que RFID pasivo en UHF permite lecturas hasta una distancia de 7 m la idea de contabilizar gente en paraderos abiertos comienza a parecer factible. Sin embargo este rango de lectura es efectivo solamente cuando hay línea de

vista entre tag y lector. Futuras investigaciones podrían evaluar el uso de tarjetas pasivas y semi-pasivas (PowerID, 2008) EPC Gen 2 en estas condiciones. Un punto de partida para simular estas condiciones son los experimentos propuestos en el anexo G.

- Usar RuBee, una tecnología cercana a RFID que funciona en la banda LF y por lo tanto tiene una buena respuesta con líquidos y metales (Figura 5.1). En RuBee la antena va enterrada en el suelo y puede tener un tamaño de hasta 30 m x 30 m. Todos los tags que pasan sobre la antena son leídos. Con este tipo de antenas se puede cubrir el espacio de un paradero y detectar a todos los pasajeros que esperan en él. RuBee es una nueva tecnología estandarizada en IEEE P1902.1, pero todavía no muy difundida.



FIGURA 5.1. Antena RuBee enterrada en el suelo, lee todos los tags que están sobre ella, independiente de los materiales (Wikipedia - RuBee)

Temas secundarios:

- Diseñar una solución similar a la propuesta utilizando un lector de menor costo, menor desempeño y menor sofisticación, buscando reducir el costo de implementación de la solución. Por ejemplo: una sola antena, interfaz TTL o RS-232, manejo del lector por circuitos integrados y no a través del PC, lo que además hace necesario crear un medio de almacenamiento de los IDs leídos y el *time-stamp* de la lectura.
- Probar factibilidad de la solución utilizando Mifare + ISO 15693.
- Aplicar teoría de *beam-forming* a la solución de portal propuesta en esta tesis intentando mejorar la detectabilidad de las tarjetas.
- Utilizar tarjetas UHF EPC Gen 2 semi-pasivas (PowerID, 2008). Estas se pueden utilizar con el mismo equipo Sirit IN510 y tienen un alcance con línea de vista y condiciones óptimas de 30-40 m vs. los 5-7 m de tarjetas pasivas EPC Gen 2.

- Un tema que debe ser estudiado es el uso de antenas altamente direccionales en un eje y de gran apertura en el eje perpendicular. Estas antenas son de mayor tamaño que las utilizadas y permitirían abarcar el mismo espacio utilizando menos antenas. De esta forma se podría ahorrar en cantidad de lectores por bus. A pesar del mayor costo de este tipo de antenas, por ejemplo un bus con dos puertas requeriría solamente un lector, controlando dos antenas por puerta.
- Usar tarjetas duales Mifare + LF. A pesar que los tags en la banda de frecuencia LF tienen baja tasa de datos, sería interesante estudiarlos por su buen comportamiento en cercanía de agua, cuerpo humano y metales.
- Se debe estudiar la capacidad para identificar pasajeros de los sistemas de SAW tags (*Surface Acoustic Wave*). Tienen mejor relación con el cuerpo humano y los metales, comparados con UHF. Una desventaja es su precio y el hecho que sean menos difundidos que EPC Gen 2.
- Estudiar detección de suela de zapatos utilizando un *scanner en el suelo*, puesto como una alfombra en la puerta.
- Estudiar detección de zapatos utilizando cámaras a la altura de los pies.

BIBLIOGRAFIA

- Acorel. (2008). *Automatic people counting systems*. Web. (<http://www.acorel.com/en/ACOREL%20Onboard%20Counter.pdf/>)
- Albiol, A., Mora, I., & Naranjo, V. (2001, December). Real-time high density people counter using morphological tools. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2(4), 204–218.
- AlienTechnology. (2008). *ALN-9534 2x2 inlay - product overview*. (http://www.alientechnology.com/docs/products/DS_ALN_9534_2x2.pdf/)
- Alippi, C., Cogliati, D., & Vanini, G. (2006, May). A statistical approach to localize passive RFIDs. In *IEEE Proceedings, International Symposium on Circuits and Systems 2006 - ISCAS 2006*.
- Altelicon. (2008). *CA-240 coaxial cable*. (<http://www.altelicon.com/pdfs/ca-240.pdf/>)
- Banks, J., Hanny, D., Pachano, M. A., & Thompson, L. G. (2007). *RFID applied*. Wiley.
- Bridgelall, R. (2003). Enabling mobile commerce through pervasive communications with ubiquitous RF tags. *2003. WCNC 2003. 2003 IEEE Wireless Communications and Networking*, 3, 2041–2046.
- Cavem. (2005, September). *Cómo funciona y cuáles son los costos de su tag*. Web. (<http://www.cavem.cl/noticias.php?idnoticia=59/>)
- Cerino, A., & Walsh, W. P. (2000, October). Research and application of radio frequency identification (RFID) technology to enhance aviation security. In *National aerospace and electronics conference, 2000. NAECON 2000. proceedings of the IEEE 2000* (pp. 127–135). Dayton, OH.
- Chen, T.-H., Chen, T.-Y., & Chen, Z.-X. (2006, December). An intelligent people-flow counting method for passing through a gate. In *Robotics, automation and mechatronics, 2006 IEEE conference on* (pp. 1–6). Bangkok.

- Collao, C. (2008). *Sistema de soporte para control de inventarios mediante RFID*. Departamento de Ciencias de la Computación, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Costanera norte. (2008). (<http://www.costaneranorte.cl/>)
- Crabtree, M. R. (2002, March). Smart pedestrian counter system (SPECS). In *Road transport information and control, 2002. eleventh international conference on (conf. publ. no. 486)* (pp. 100–104). London.
- DILAX. (2008). *Automatic passenger counting(APC) - corporate overview*. (<http://www.dilax.com/pdf/eng/profil/>)
- Dobkin, D. M. (2007). *The RF in RFID - passive UHF RFID in practice* (Elsevier, Ed.). Newnes.
- Duke, G. (1998). Creating the superbuss with ITS. 4th Framework project TABASCO - Telematics Applications in Bavaria Scotland and Others).
- Eurotech. (2008). *Commercial passenger counter*. (<http://www.eurotech.com/>)
- Finkenzeller, K. (2003). *RFID handbook - fundamentals and applications in contactless smart cards and identification*. Wiley.
- Foster, K. R., & Jaeger, J. (2007). RFID inside. the murky ethics of implanted chips. *IEEE Spectrum*.
- Graafstra, A. (2006). *RFID toys*. Wiley.
- Graafstra, A. (2007). Hands on. how radio frequency identification and i got personal. *IEEE Spectrum*.
- Infodev. (2008). *Automatic people counting systems for buildings and transit*. (http://www.infodev.ca/fileadmin/user_upload/PDF/INFODEV_Corporate.pdf)
- IPICO. (2007). *IP-X read-only dual frequency RFID tag laminated credit card type*. Web. (<http://www.ipico.com/>)

Iris. (2008). *Irma - mobile passenger counting*. (http://www.irisgmbh.de/iris-GmbH_i/products/mobile-passenger-counting/index.html/)

Laitan Holding Corp. (2008). (<http://www.laitan.ca/>)

Lee, S.-W., & Mase, K. (2001, September). Recognition of walking behaviors for pedestrian navigation. In *Control applications, 2001. (CCA '01). proceedings of the 2001 IEEE international conference on* (pp. 1152–1155). Mexico City.

Leong, K. S., Ng, M. L., & Cole, P. (2007). A simple dual-frequency antenna design for RFID tag. *Auto-ID Labs*.

Lienhart, R., & Maydt, J. (2002, September). An extended set of haar-like features for rapid object detection. In *Image processing. 2002. proceedings. 2002 international conference on* (Vol. 1, pp. 900–903).

McCoy, T., Bullock, R. J., & Brennan, P. (2005). RFID for Airport Security and Efficiency. The IEE Professional Network on Signal Processing.

Mifare. (2008). *NXP web page*. (<http://www.nxp.com/>)

Mitsugi, J. (2005). UHF band RFID readability and fading measurements in practical propagation environment. *Auto-ID Labs*.

Nakamoto, H., Yamazaki, D., Yamamoto, T., Kurata, H., Yamada, S., Mukaida, K., et al. (2007, January). A passive UHF RF identification CMOS tag IC using ferroelectric RAM in 0.35-*mu*hboxm technology. In *Solid-state circuits, IEEE journal of* (Vol. 42, pp. 101–110). Lille, France.

PowerID. (2008). *PowerP datasheet - Battery assisted passive ISO sized tag*. (<http://www.power-id.com/Data/pdf/DatasheetPowerP.PDF/>)

Poynting. (2008). *RFID patch antenna - PATCH-A0025*. (<http://www.poynting.co.za/products/brochure/POYNTING%20-%20PATCH-A0025.pdf/>)

Reitz, J. R., Milford, F. J., & Christy., R. W. (1986). *Fundamentos de la teoría electromagnética*. Addison-Wesley Iberoamericana.

Reynolds, M., Richards, J., Pathare, S., Tsai, H., Maguire, Y., Post, R., et al. (2006). Multi-band, low-cost EPC tag reader. *Auto-ID Labs*.

RFID journal. (2008). (<http://www.rfidjournal.com/>)

Ross, S. M. (2002). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. McGraw-Hill.

Rowley, H. A., Baluja, S., & Kanade, T. (1996, June). Neural network-based face detection. In *Computer vision and pattern recognition, 1996. proceedings CVPR '96, 1996 IEEE computer society conference on* (pp. 203–208). San Francisco, CA.

Sauquet, T., Marcel, S., & Rodriguez, Y. (2005). *Multiview face detection*. IDIAP research report.

Sirit. (2008). *INfinity 510 reader datasheet* (Tech. Rep.). (http://www.sirit.com/UserFiles/File/ds_510.pdf/)

Thomas, A. (2004, July). *Radio frequency identification (RFID)*. Parliamentary Office of Science and Technology, postnote.

Transantiago. (2008). (<http://www.transantiagoinforma.cl/>)

Trossen robotics. (2008). (<http://www.trossenrobotics.com/>)

Verichip corp. (2008). (<http://www.verichipcorp.com/>)

Viola, P., & Jones, M. (2001). *Rapid object detection using a boosted cascade of simple features*. Conference on computer vision and pattern recognition 2001.

Viola, P., & Jones, M. (2003). *Fast multiview face detection*. MERL, Tech Report TR2003-96.

Werb, J., & Lanzl, C. (1998, September). Designing a positioning system for finding things and people indoors. *IEEE Spectrum*, 35(9), 71–78.

Wikipedia-DSRC. (2008). *DSRC - dedicated short range communications*. (http://en.wikipedia.org/wiki/Dedicated_Short_Range_Communications/)

Wikipedia - electronic toll collection. (2008). (http://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_toll_collection/)

Wikipedia - helmholtz coil. (2008). (http://en.wikipedia.org/wiki/Helmholtz_coil/)

Wikipedia - normal distribution. (2008). (http://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution/)

Wikipedia - RFID. (2008). (<http://en.wikipedia.org/wiki/Rfid/>)

Wong, Y. F., Wu, P. W. K., Wong, D. M. H., Chan, D. Y. K., Fung, L. C., & Leung, S. W. (2006, February/March). RFI assessment on human safety of RFID system at Hong Kong International Airport. In *Electromagnetic compatibility, 2006. EMC-Zurich 2006. 17th international zurich symposium on* (pp. 108–111).

Yang, G., & Huang, T. S. (1994). *Human face detection in complex background.* *Pattern Recognition*, 27(1):53-63.

Yow, K. C., & Cipolla, R. (1996). *Feature-based human face detection.* University of Cambridge - Department of Engineering.

Zhu, Z., Jamali, B., & Cole, P. H. (2005). An HF/UHF RFID analogue front-end design and analysis. *Auto-ID Labs.*

ANEXO A. NORMAS RFID

A.1. Normas en la banda LF

A.1.1. EM4102

Este es el nombre del chip fabricado por EM Microelectronic-Marin SA. Estos tags funcionan a 125kHz (entre 100 y 150 kHz). Tienen una memoria de 64 bits que solamente se puede leer, no escribir. Debido a la baja frecuencia portadora la tasa de datos también es baja. Estos tags están aceptados para marcar animales (cumplen ISO 11784/85), ya sea implantándolos o colgándolos de la oreja. Además se le puede dar un uso industrial. En esta banda de frecuencia las antenas tienen más vueltas que con HF (alta frecuencia).

A.1.2. Hitag

Este es el nombre del chip fabricado por Philips. Estos tags funcionan a 125 kHz (entre 100 y 150 kHz). Tienen capacidades de almacenamiento de 32, 256 y 2048 bits. Soportan anticolidión. Permiten rangos de lectura de hasta 2 m. Los de 256 y 2048 bits cumplen con normativa de Animal Tracking (ISO 11784/85) y Pigeon Race Standard.

En la norma Animal Tracking ISO 11784 define la estructura del código de identificación. Mientras que ISO 11785 define los protocolos de comunicación entre tag y lector; especifica de que manera se debe activar el tag y la forma en que transmite la información al lector. (wikipedia - ISO 11784/85)

El Pigeon Race Standard define el uso de RFID tags para contabilizar el tiempo en carreras de palomas. Es una forma de reemplaza el modo tradicional en el cual se utiliza un anillo plástico impreso con un número serial. En la forma tradicional el entrenador lee el número serial al llegar la paloma. Al utilizar anillos RFID se colocan antenas en el camino y cuando la paloma pasa cerca de ellas se registra el número serial electrónico de su tag. (wikipedia - pigeon racing).

A.2. Normas en la banda HF

A.2.1. MicroID

Este es el nombre de la norma desarrollada por Microchip. Funciona a 13.56MHz y no se acoge a la normativa ISO. Tiene su propio protocolo anticolidión del tipo aloha-ranurado. La capacidad de almacenamiento es de 154 bits. Microchip recomienda este tag para:

librerías y bibliotecas, tracking de equipaje en aerolíneas, juguetes, control de acceso, asset tracking y aplicaciones que leen múltiples tags y de largo alcance. El producto ofrecido por Microchip es un Chip encapsulado PDIP-8 o SOIC-8 que permite construir lectores y tags activos.

A.2.2. Proximity Cards - ISO 14443

Esta es la norma definida por ISO para tarjetas de proximidad. Funcionan a 13.56 MHz y tienen un alcance de hasta 10 cm. A esta frecuencia la comunicación entre tag y lector se da por acoplamiento magnético. La norma define que el tag debe ser capaz de responder al estar sometido a un campo de entre 1.5 A/m y 7.5 A/m (Finkenzeller, 2003). El campo magnético generado por el lector depende de la forma de la antena utilizada y decae con la distancia. Existen dos subtipos de esta norma, A y B. Difieren en los coeficientes de modulación, tipo de modulación, codificación de bit y modos anticollisión. ISO 14443-A utiliza *binary search*, mientras que ISO 14443-B utiliza *slotted-aloah*. Para recuperar IDs de múltiples tags lo más eficiente es *slotted-aloah*, pero en el caso de ISO14443-B el ID entregado puede ser pseudoaleatorio, por lo que para obtener el ID verdadero se debe acceder a la memoria del tag y solicitarlo lo que perjudica el desempeño. No está claro cual de los dos subtipos es más rápido para realizar un *polling* de IDs. Pero debido al bajo rango de alcance difícilmente estos lectores se enfrenten a un ambiente altamente saturado de tags. Tarjetas de esta norma se utilizan para control de acceso y como medio de pago, reemplazando tarjetas con cintas magnéticas, *smart cards* con contacto, monedas, boletos.

ISO 14443 fue diseñado pensando en 10cm de alcance. En general los lectores para esta norma son de relativamente baja complejidad y tamaño. La mayoría de ellos utiliza antenas integradas. El precio de estos lectores es reducido, por \$115 USD se puede conseguir un lector OEM (Graafstra, 2006). Por unos \$200 USD (USA/Argentina) se puede obtener un lector de escritorio encapsulado y con conexión USB. El precio de los tags es similar a otras tarjetas. Las calcomanías pueden ser más caras que tags en UHF, debido a que en la banda de frecuencia HF las antenas están formadas por bobinas con 5-10 vueltas de material conductor, mientras que en UHF las antenas son más simples de fabricar. También debido a la capacidad de almacenamiento y encriptación de esta norma los circuitos integrados utilizados en los tags son de tamaño mayor que UHF, y por lo tanto más costosos.

A.2.3. Vicinity Cards - ISO 15693

Esta es la norma definida por ISO para tarjetas de vecindad. Funcionan a 13.56 MHz y tienen un alcance de hasta 1 m. A esta frecuencia la comunicación entre tag y lector se da por acoplamiento magnético. La norma define que el tag debe ser capaz de responder al estar sometido a un campo de entre 0.115 A/m y 5 A/m (Finkenzeller, 2003). En este caso la comunicación entre lector y tag se da de manera similar a la norma ISO 14443, la diferencia está en que los chip ISO 15693 requieren menor energía para activarse. Para lograr esta eficiencia energética los chips utilizados tienen menor capacidad de memoria y seguridad, además de poseer instrucciones más sencillas y limitadas. Debido al buen rango y a la capacidad limitada en memoria y seguridad estas tarjetas generalmente no se utilizan como medio de pago, sino que sirven para control de acceso y para realizar inventarios reemplazando al código de barra.

Los tags ISO 15693 utilizan la misma antena que los de la norma ISO 14443. La diferencia está en el chip, que consume menos energía y tiene menos memoria. Pero ese motivo los tags pueden ser un poco más baratos que ISO 14443. Para esta norma existen lectores de rangos corto, mediano y largo. Por lo tanto hay una variedad de precios de lectores. Generalmente los de corto rango también leen ISO 14443 - Mifare y tienen precios similares a aquellos: \$115-200 USD. Los de mediano alcance pueden tener precios similares. Los de alto rango tienen precios de unos \$1.000 USD.

A.2.4. Mifare

Philips ha aprovechado la norma ISO 14443-A para desarrollar un producto que ha tenido un gran éxito. Las tarjetas Mifare están ampliamente reconocidas en el mundo como un medio de pago seguro. Cumplen con todas las especificaciones ISO 14443-A y agregan utilidades que hacen más segura la transacción. Existe más de un tipo de tarjetas Mifare con capacidades de 512 bits, 1 Kbytes y 4 Kbytes. En varios sistemas de transporte público del mundo se utilizan este tipo de tarjetas. Transantiago no es la excepción, la tarjeta Bip es una tarjeta Mifare de 1 Kbytes de capacidad. El sitio de Mifare dice que hoy hay más de 200 millones de circuitos integrados Mifare classic en uso en el mundo, lo que representa un 85% del mercado de las tarjetas sin contacto. Utilizando un lector ISO 14443-A generalmente solo se puede leer el ID de las tarjetas Mifare, para leer y escribir se debe utilizar un lector Mifare comercializado por Philips. Cabe mencionar que Philips es la compañía que produce los lectores y los circuitos integrados tags, las tarjetas y

sus antenas generalmente son fabricadas por otras compañías que luego comercializan las tarjetas.

A.2.5. Icode1 e Icode2

Esta es la implementación es de Philips para tags pasivos de largo alcance en la banda de 13.56MHz. Icode1 tiene 512 bits de memoria y cumple con especificaciones FCC 15 part 3 y ETSI EN 300 330 y EN 300 683. Utilizando antenas tipo portal tiene un alcance de 1.5 m como EAS¹ y 1.2 m para leer y escribir IDs completos. Tienen implementada anticolidión y no necesitan línea de vista para ser leídos.

Icode2 es una implementación de Philips para la norma ISO 15693. Tiene 1024 bits de memoria, un Id único de 64 bits, escritura protegida, alcance de hasta 1.5 m para lectura y escritura, capacidad de anticolidión. Es compatible con los lectores Icode anteriores y con los lectores ISO 15693. Este producto se desarrolló pensando en bibliotecas automatizadas, supply chain management y bodegas de equipaje de aerolíneas. Cabe mencionar que Philips es la compañía que produce el chip. Luego otras compañías fabrican antenas y utilizan el chip para fabricar tags.

A.2.6. Tag-It

Implementación de Texas-Instruments de tags pasivos en la banda HF de 13.56 MHz.

A.3. Normas en la banda UHF

A.3.1. ISO 18000-4

Es la estandarización de sistemas RFID en la banda de Microondas.

A.3.2. ISO 18000-6

Estandarización de tags en todas las frecuencias. ISO18000-6 está dedicado a UHF pasivos. ISO18000-6A y B fueron publicados con posterioridad a EPC Gen 2, por lo que luego EPC Gen 2 fue incluido como ISO18000-6C.

A.3.3. ISO18000-7

Está dedicado a sistemas UHF RFID activos.

¹Electronic Article Surveillance, es el típico tag que se utiliza en multitiendas para evitar robos. Básicamente es un tag con un ID de 1 bit; activado o desactivado.

A.3.4. EPC Gen 1

Primera generación del estándar desarrollado por EPC. Obsoleto luego de la introducción de EPC Gen 2, que resolvía problemas de este primer esfuerzo por desarrollar un estándar en UHF destinado a aplicaciones de inventario.

A.3.5. EPC Gen 2

Segunda generación del estándar desarrollado por EPC, ampliamente aceptado y difundido en el mundo. Aproximadamente en Julio de 2007 ISO incorporó este standard como ISO18000-6C. Existen diferencias en la normativa de potencia y canales permitidos en distintas partes del mundo. Sin, embargo, Los equipos y tags más populares de esta norma son capaces de operar en cualquier parte del mundo. Las bandas ISM son diferentes para Estados Unidos y para Europa (Bridgelall, 2003):

- Norteamérica, Sudamérica y Taiwan: 902-928MHz
- EU: 865-869MHz
- Australia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y China: 918-926MHz

Esta norma tiene capacidad para un ID de 96 bits. Dependiendo del tamaño del tag se obtienen diferentes rangos de lectura con línea de vista: 1,5m para un tag de 2,4cm x 3,3cm, 7,6m para un tag de 2,5cm x 15,2cm. Esta norma UHF tiene mayor tasa de datos y tasa de lecturas de tags que las normas en HF y LF. Esto se debe al mayor ancho de banda disponible.

Hay lectores de largo alcance desde unos \$1.000 USD, los lectores de mayor desempeño y número de antenas cuestan unos \$3.000 USD. Esta norma es la más difundida para aplicaciones de bodegaje de largo alcance y su competencia más directa es ISO 15693.

Recientemente se han lanzado al mercado tags semi-pasivos que cumplen completamente con esta normativa (PowerID, 2008). Además Alien Technology comercializa tags que cumplen con los requisitos de EPC Gen 2 y agregan capacidades de memoria y seguridad adicionales.

A.3.6. Ucode

Es el nombre de los tags pasivos en UHF de Philips que cumplen con normativas ISO18000-6A, ISO18000-6B y EPC Gen 2. Como otros tags pasivos en esta banda tienen un alcance de hasta 7 m.

A.3.7. Televisión - Tag - Norma DSRC

Estos son los Tag de las autopistas concesionadas de Santiago/Chile. Son tags activos y operan en la banda de frecuencia UHF, específicamente en las microondas.

En (Cavem, 2005) aparece información sobre estos tags. Son tags activos, cuya batería tiene una duración de 5 años. Luego se debe cambiar la batería. La norma bajo la que operan se denomina DSRC. Esta norma es un subtipo de RFID, permite la identificación de los automóviles a cualquier velocidad. Estos tags operan en los 5.8 GHz. El sistema contempla cámaras que detectan el vehículo a 12 m y 7 m para la comunicación del tag.

La mayor parte del tiempo estos dispositivos están en stand by, gastando menos energía. Con una señal de 10 ms de duración se activan, luego en 30 ms completan la transmisión y recepción de información con el portal.

Luego toda esta información es enviada desde los portales a las oficinas centrales utilizando fibra óptica.

El año 2005 tres compañías ofrecían estos tags:

- Una empresa sueca-austríaca Kapsch-Combitech
- Una francesa CSSI
- Una noruega Q-Free

Se han vendido a las concesionarias más de 1 millón de estos dispositivos.

En (Wikipedia-DSRC, 2008) aparece información sobre DSRC (Dedicated Short Range communications). Es una norma desarrollada específicamente para uso en vehículos. En USA se utiliza la banda de 5.9 GHz, mientras que en Japón y Europa se utilizan los 5.8 GHz. Versiones anteriores de esta norma usaban la banda ISM de 915 MHz.

Otros short range wireless protocols son IEEE 802.11, Bluetooth y CALM.

La organización de estandarización europea CEN junto con ISO han desarrollado las siguientes normas:

- EN 12253:2004 Dedicated Short-Range Communication - Physical layer using microwave at 5.8 GHz (review)
- EN 12795:2002 Dedicated Short-Range Communication (DSRC) - DSRC Data link layer: Medium Access and Logical Link Control (review)
- EN 12834:2002 Dedicated Short-Range Communication - Application layer (review)

- EN 13372:2004 Dedicated Short-Range Communication (DSRC) - DSRC profiles for RTTT applications (review)
- EN ISO 14906:2004 Electronic Fee Collection - Application interface

Algunas posibles aplicaciones de esta norma son:

- Emergency warning system for vehicles
- Cooperative Adaptive Cruise Control
- Cooperative Forward Collision Warning
- Intersection collision avoidance
- Approaching emergency vehicle warning (Blue Waves)
- Vehicle safety inspection
- Transit or emergency vehicle signal priority
- Electronic parking payments
- Commercial vehicle clearance and safety inspections
- In-vehicle signing
- Rollover warning
- Probe data collection
- Highway-rail intersection warning

A.4. Rangos de lectura

A modo de resumen se muestran los rangos en cada banda para todo tipo de tags:

Rangos tags pasivos

- LF: 0,33 m hasta 2 m (Hitag)
- HF: 10 cm en ISO14443, 1-1,5 m en ISO 15693
- UHF: 7 m (UCODE, EPC G2)

Rangos semi-pasivos

- LF: -
- HF: -
- UHF: 30 m (BAP Alien, BAP powerID), 50 m (BAP secure RF)

Rangos activos

- LF: -
- HF: -
- UHF: 100 m (IdentecSolutions)

ANEXO B. RESUMEN ALTERNATIVAS

Inicialmente la propuesta de esta tesis se centraba en extender el rango de las tarjetas bip y multivía (ISO 14443-A y B) utilizadas actualmente en Transantiago. Luego de un análisis inicial se concluyó que esta alternativa no es viable (Anexo C). A continuación se enumeran los motivos:

- (i) Tarjetas hechas para funcionar a 10 cm, por lo tanto se necesita un factor de potencia de 10x en los lectores, lo que hace escape totalmente a la normativa de la FCC.
- (ii) Anticolisión en ISO 14443-A es por *binary search*, por lo que hay que desactivar el tag al leerlo, esto hace el proceso de *polling* más lento.
- (iii) Anticolisión en ISO 14443-B es por aloha ranurado, eso es bueno, pero el problema es que el ID puede ser PUPI (pseudoaleatorio). Por lo tanto la tarjeta lo entrega solo para que se pueda seleccionar. Solo al tener una conversación con ella se obtiene el verdadero ID. Lo que hace que el *polling* no sea tan rápido como en aloha ranurado puro.

Revisando las características de otras normas RFID en LF, HF y UHF no existe ninguna que sea superior en seguridad comparada con Mifare. Además en el caso de Transantiago ya esta operativa la norma Mifare y cambiarla sería de alto costo. Por lo tanto si se desea utilizar otra norma RFID para conteo el conteo de pasajeros se debe pensar en un sistema dual. Las alternativas estudiadas son:

- (i) Mifare + LF
- (ii) Mifare + ISO15693 (HF)
- (iii) Mifare + EPC Gen 2 (UHF)

La solución puede estar dada por una tarjeta dual, conteniendo tags de ambas normas, o por tarjetas Mifare con un tag tipo calcomanía en LF, HF o UHF.

B.1. Mifare + tag en la banda LF

Si se opta por la banda LF utilizando la norma EM4102 no se gana nada, porque el rango de lectura de esta norma es similar a Mifare.

Por otro lado está la alternativa de la norma Hitag en LF. En este caso el rango es de 1.5 - 2m. Sin embargo esta alternativa presenta las siguientes incomodidades:

- Tasa de datos en LF es mucho menor que HF.
- Anticolisión en Hitag es de bajo rendimiento, solamente detecta colisión.
- Norma Hitag muy poco difundida en comparación con Mifare y otras alternativas.
- Antenas LF tienen mayor cantidad de vueltas, por lo que la tarjeta puede ser más pesada, pero principalmente más cara que otra alternativa.

B.2. Mifare + ISO 15693

ISO 15693 tiene un rango de hasta 1,5-2 m. Es la evolución natural de Mifare al querer incrementar el rango y perder un poco de capacidad. En la banda de frecuencia HF se tiene interferencia de objetos metálicos. La puerta del bus es metálica y por lo tanto esto implica un grado de desafío. Pero por otro lado se tiene la ventaja de que no hay interferencia por agua, o por el cuerpo humano.

Este sistema podría ser el más adecuado, pero debido a que Mifare e ISO 15693 operan en la misma frecuencia posiblemente no sea factible utilizar una tarjeta dual Mifare + ISO 15693. Se hicieron pruebas sencillas en el laboratorio RFID de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile y existe un nivel de interferencia importante que prácticamente anularía la factibilidad de esta tarjeta dual.

Esta norma no es la más difundida en el mundo, pero es la principal competencia de UHF en ambientes de lectura complicados.

B.3. Mifare + EPC Gen 2

EPC Gen 2 es la norma más difundida actualmente en aplicaciones de inventario. Recientemente ha sido aceptada por ISO bajo la sigla ISO 18000-6C. Existe una buena cantidad de fabricantes de lectores y tags. El alcance máximo de tags EPC Gen 2 pasivos es de 7 m y se ve disminuido por interferencia de líquidos, cuerpo humano y multi-trayectoria.

En cuanto a tasa de datos, velocidad de adquisición de tags y soluciones anticolisión esta alternativa es superior a cualquier otra norma.

La tarjeta Mifare + EPC Gen 2 es la única disponible en el mercado, aunque no es un producto estándar. Se han hecho pruebas simples y al parecer Mifare no hace ninguna interferencia a la lectura de EPC Gen 2, a pesar de estar en la misma tarjeta.

ANEXO C. EXTENSIÓN DE RANGO MIFARE

Según Finkenzeller (2003) la intensidad de campo magnético H [A/m] a lo largo del eje central x [m] de una antena circular con N vueltas de espiras, de radio R [m], por la que circula una corriente de I [A], donde $x = 0$ es el centro de la antena (Figura C.1), se representa por la siguiente ecuación:

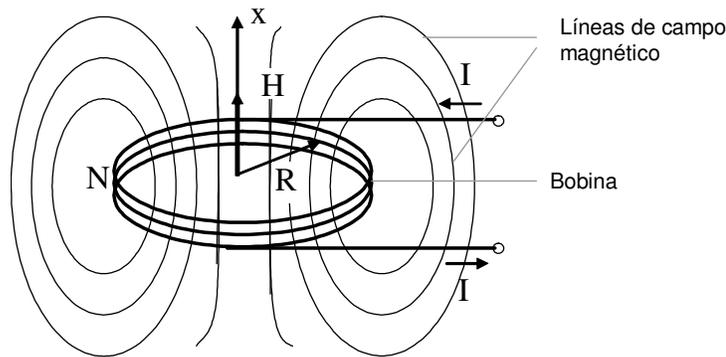


FIGURA C.1. Campo magnético H en una bobina de N vueltas, radio R , por la que circula una corriente I (Finkenzeller, 2003).

$$H[A/m] = \frac{I \cdot N \cdot R^2}{2\sqrt{(R^2 + x^2)^3}} \quad (C.1)$$

La ecuación C.1 es válida solamente para el campo cercano de la antena. El límite entre campo cercano y campo lejano depende de la longitud de onda de la señal según $\frac{\lambda}{2\pi}$ (Finkenzeller, 2003). La longitud de onda de la señal λ se calcula como

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (C.2)$$

Donde c es la velocidad de la luz (aproximadamente 300.000 km/s en el vacío) y f es la frecuencia de la señal (13,56 MHz en Mifare). Así, la longitud de onda de las señales utilizadas en Mifare resulta de 22,1 m y el límite entre campo cercano y lejano se encuentra a los 3,5 m.

Además, según Finkenzeller (2003) los sistemas que operan por acoplamiento inductivo no pueden energizar tags a una distancia mayor que el límite entre campo cercano y campo lejano. Por lo tanto, el alcance de cualquier sistema inductivo operando a 13,56 m está limitado a 3,5 m.

Las tarjetas ISO 14443-A (estándar cumplido por Mifare) se energizan bajo campos magnéticos de intensidad máxima $H_{max} = 7,5[A/m]$ e intensidad mínima $H_{min} = 1,5[A/m]$. Exponer la tarjeta a una intensidad de campo magnético mayor a H_{max} podría dejarla inutilizable. Por otro lado, exponer la tarjeta a una intensidad de campo magnético menor a H_{min} no permite su lectura.

Para energizar este tipo de tarjetas, la espira de la antena del tag debe estar perpendicular a las líneas de flujo magnético, de manera tal que estas atraviesen el espacio encerrado por la bobina. Si el campo magnético H en la zona de la tarjeta presenta un ángulo de inclinación α diferente de los 90° requeridos, la intensidad efectiva recibida por la espira de la antena del tag será de $H_{tag} = H \cdot \sin \alpha$. Una espira paralela a las líneas de flujo magnético no logra capturarlas y es equivalente a tener un ángulo $\alpha = 180^\circ$, con lo que el flujo efectivo en la antena del tag sería $H_{tag} = H \cdot \sin 180^\circ = 0[A/m]$.

Los típicos lectores de tarjetas Mifare (bip) que se utilizan en el metro de Santiago o en los buses del Transantiago tienen antenas de unos 7 cm de radio. Contando con una separación mínima entre antena y tarjeta de unos 2 cm, dada por la cubierta de plástico de estos lectores. Para no dañar la tarjeta, estos lectores deberían estar calibrados para entregar una intensidad de campo magnético de $H_{lector_bip} = H_{max} = 7,5[A/m]$ a 2 cm del centro de la antena. Aplicando la ecuación C.1 se tiene que estos lectores operan con un factor de ampere-vueltas de $N \cdot I = 1,18$. Utilizando la misma ecuación, junto con el valor de ampere-vueltas NI calculado y la intensidad de campo magnético mínima requerida para energizar la tarjeta $H_{min} = 1,5[A/m]$ se obtiene una distancia máxima de 10,3 cm, a la que se podría leer una tarjeta utilizando este tipo de lectores.

En el escenario descrito en el párrafo anterior, aumentar la potencia suministrada a la antena (incrementando los ampere-vueltas $N \cdot I$) lograría aumentar el rango de lectura pero sobrepasaría intensidad de flujo máxima permitida para este tipo de tarjetas. Suponiendo que las tarjetas son resistentes, y que permiten aplicar el doble de intensidad magnética a su antena (duplicando también el voltaje suministrado al circuito integrado de la tarjeta), se puede calcular el nuevo rango de lectura resultante al aumentar $N \cdot I$ a 2,36 ampere-vueltas. Aplicando la ecuación C.1 el nuevo rango máximo de lectura es de 14 cm.

Teniendo en cuenta que una puerta de un bus del Transantiago tiene 1,15 m de ancho y si se coloca una antena a cada lado de ella, estas deberían tener un alcance de por lo menos 57,5 cm para detectar al tag. Se puede aplicar nuevamente la ecuación C.1 para obtener el valor de ampere-vueltas $N \cdot I$ que se debiera aplicar a la antena del lector, así como también se puede obtener la intensidad de campo magnético que se tendría a 2 cm de la antena del

lector, recordando que se precisa un valor mínimo de intensidad de campo magnético de $H_{min} = 1,5[A/m]$ para energizar la tarjeta. Los valores resultantes son 119,0 ampere-vueltas para $N \cdot I$ y $755,6[A/m]$ de intensidad de campo magnético a 2 cm de la antena lectura, superando en un factor de 100 veces la intensidad magnética máxima definida en el estándar ISO 14443-A.

Finkenzeller (2003, pp. 65) evalúa la ecuación C.1 y de ella obtiene un nexo entre el radio óptimo de la antena del lector y el rango de lectura que se quiere conseguir —óptimo en el sentido que minimiza la energía aplicada y por tanto el factor de ampere-vueltas $N \cdot I$. La conclusión es que para leer un tag a una distancia x del centro de la antena lo óptimo es contar con una antena de radio $R = x \cdot \sqrt{2}$. Por lo tanto, para leer un tag a una distancia de 57,5 cm lo recomendable es una antena de radio 81,3 cm, valor muy lejano al tamaño de 7 cm analizado en los párrafos anteriores.

Repitiendo los últimos cálculos de intensidad de campo magnético usando la ecuación C.1, con $x = 57,5\text{cm}$, $R = 81,3\text{cm}$, $H_{min} = 1,5[A/m]$, resulta que para leer una tarjeta Mifare a 57,5 cm de la antena se requiere un factor ampere-vueltas $N \cdot I$ de 4,5; lo que a 2 cm de la antena resulta en una intensidad de campo $H = 2,75A/m$, cumpliendo con el rango de intensidad de flujo magnético definido en el estándar.

Además de los límites físicos de las señales electromagnéticas, en cada país existen organizaciones que regulan la potencia máxima a emitir en cada banda de frecuencia. Generalmente, bandas de frecuencia licenciadas permiten un nivel de emisiones superior al de bandas no licenciadas. Lo anterior se debe a que en las bandas de frecuencia no licenciadas deben coexistir equipos pertenecientes a distintos individuos que no desean intercomunicarse, por lo que la señal proveniente del otro equipo actúa como fuente de interferencia que impide su correcto funcionamiento. En la banda de los 13,56 MHz, la normativa chilena emitida por la Subsecretaría de Telecomunicaciones aplica las mismas regulaciones que el Instituto Europeo de Estándares de Telecomunicaciones (ETSI). Por su lado, la ETSI define que para la banda de 13,56 MHz el límite de potencia es de $42\text{dB}\mu A/m$ a 10 m de la antena transmisora (Finkenzeller, 2003, pp. 175).

La ecuación C.1 aplica solamente hasta el punto de transición entre campo cercano y lejano, a los 3,5 m. Sin embargo, la normativa ETSI define el límite de intensidad de campo magnético a una distancia de 10 m de la antena transmisora (antena del lector en caso RFID Mifare). Finkenzeller (2003, pp. 114, 167) extiende la ecuación C.1 para describir la intensidad de campo magnético en el campo lejano de la antena, es decir, más allá del límite de 3,5 m. Luego de este límite, el decaimiento de la señal es de 20 dB por

década, un factor de decaimiento de 10 veces por cada incremento de la distancia en un factor de 10 veces. El primer paso para obtener esta ecuación extendida es traspasar la ecuación C.1 a decibelios para la distancia límite (3,5 m):

$$H[dBA/m] = 20 \cdot \log \left[\frac{I \cdot N \cdot R^2}{2\sqrt{(R^2 + (3,5[m])^2)^3}} \right] \quad (C.3)$$

Con lo que la ecuación en decibelios para describir el campo magnético más allá de los 3,5 m es:

$$H[dBA/m] = 20 \cdot \log \left[\frac{I \cdot N \cdot R^2}{2\sqrt{(R^2 + (3,5[m])^2)^3}} \right] - 20 \cdot \log (x - 3,5[m]) \quad (C.4)$$

El límite de intensidad de campo magnético definido por la ETSI es de $42dB\mu A/m$ a 10 m de la antena del lector, lo que equivale a $42dB\mu A/m - 120dB = -78dBA/m$. Insertando valores de $R = 81,3cm$, $x = 10m$ y $N \cdot I$ igual a 4,5 ampere-vueltas en la ecuación C.4 se obtiene una intensidad de campo magnético de $-41,1dBA/m$, superando la norma ETSI en 31,9dB (equivalente a un factor de 39 veces).

Otra aproximación al problema resulta al definir a 2 cm de la antena una intensidad de flujo magnético de $H_{max} = 7,5[A/m]$ y que a 57,5 cm de la antena, esa intensidad sea de $H_{min} = 1,5[A/m]$. Con esta elección y al utilizar C.1 se generan dos ecuaciones:

$$7,5[A/m] = \frac{I \cdot N \cdot R^2}{2\sqrt{(R^2 + (0,02[m])^2)^3}} \quad (C.5)$$

$$1,5[A/m] = \frac{I \cdot N \cdot R^2}{2\sqrt{(R^2 + (0,575[m])^2)^3}} \quad (C.6)$$

Se puede dividir C.5 en 5 e igualar a C.6 resultando:

$$\frac{I \cdot N \cdot R^2}{10\sqrt{(R^2 + (0,02[m])^2)^3}} = \frac{I \cdot N \cdot R^2}{2\sqrt{(R^2 + (0,575[m])^2)^3}}$$

$$\frac{1}{5\sqrt{(R^2 + (0,02[m])^2)^3}} = \frac{1}{\sqrt{(R^2 + (0,575[m])^2)^3}}$$

$$5\sqrt{(R^2 + (0,02[m])^2)^3} = \sqrt{(R^2 + (0,575[m])^2)^3}$$

$$5^{\frac{2}{3}} (R^2 + (0,02[m])^2) = R^2 + (0,575[m])^2$$

$$5^{\frac{2}{3}} \cdot R^2 + 5^{\frac{2}{3}} \cdot 0,02[m]^2 = R^2 + (0,575[m])^2$$

$$(5^{\frac{2}{3}} - 1) \cdot R^2 = (0,575[m])^2 - 5^{\frac{2}{3}} \cdot 0,02[m]^2$$

$$R = 0,415m = 41,5cm$$

Ese valor de $R = 41,5cm$ se puede reemplazar en C.6 obteniendo un valor para $N \cdot I$ de 6,2 ampere-vueltas. Con todos estos valores se puede utilizar la ecuación C.4 para una distancia de $x = 10m$ de la antena, obteniendo una intensidad de flujo magnético de $H_{10m} = -54,8[dBA/m]$, lo que supera a la norma ETSI en 23,2dB (equivalente a un factor de 14,5 veces).

La alternativa final a evaluar es un arreglo de Helmholtz. Este consiste de dos bobinas circulares idénticas de radio R , perfectamente alineadas y enfrentadas una a otra a una distancia igual al radio R . Este arreglo de bobinas está descrito por Reitz, Milford, and Christy. (1986) y tiene la particularidad de generar un campo muy parejo en el espacio existente entre ambas bobinas, con una variabilidad de a penas 6% (*Wikipedia - Helmholtz coil*, 2008) (Figura C.2). Para lograr la lectura a 57,5 cm utilizando un arreglo de Helmholtz, el radio R de cada bobina debe ser de 1,15 m. Cada bobina es colocada a un costado de la puerta del bus y el pasajero debe atravesar el espacio que queda entre ambas bobinas. La ecuación que describe la intensidad de campo magnético a en el punto medio (en este caso 57,5 cm) entre ambas antenas es (Reitz et al., 1986):

$$H[A/m] = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{N \cdot I}{R}$$

Así, para lograr $H = 1,5[A/m]$ se necesita un factor $N \cdot I$ de 2,4 ampere-vueltas en cada bobina del arreglo de Helmholtz.

Cada una de las bobinas responde a las ecuaciones descritas anteriormente. Al generar un campo magnético parejo no se está superando la norma ISO 14443-A en ningún punto

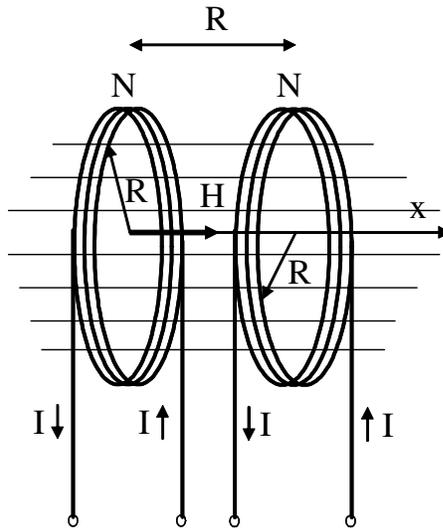


FIGURA C.2. Campo magnético H en un arreglo de Helmholtz, con bobinas de N vueltas, radio R, por las que circula una corriente I.

del espacio. Sin embargo, es de interés evaluar si este arreglo cumple con la regulación ETSI. Ambas bobinas están conectadas al mismo lector, funcionando coordinadamente, por este motivo el flujo conjunto de ambas bobinas debe ser considerado. Teniendo en cuenta que la dirección de mayor propagación se encuentra en el eje que cruza el arreglo por el centro de las bobinas y que las bobinas se encuentran separadas por 1,15 m, una distancia de 10 m del arreglo se compone de una bobina a 10 m y otra a 8,85 m. De esta manera, evaluando la ecuación C.4 para $N \cdot I$ igual a 2,4 ampere vueltas, $R = 1,15m$ y distancias x de 10 m y 8,85 m los valores obtenidos son $H_{10m} = -46,2dBA/m$ y $H_{8,85m} = -44,5dBA/m$, totalizando $H_{arreglo_{10m}} = -39,3dBA/m$ y superando a la normativa ETSI en 38,7 dB (equivalentes a un factor de 86,1 veces).

Mediante los procedimientos descritos en este anexo se ha demostrado que leer tarjetas Mifare a una distancia de 57,5 cm resulta infactible; por la combinación de la normativa ETSI de emisión electromagnética en la banda de los 13,56 MHz y la definición de los flujos máximos y mínimos soportados por la tarjeta según el estándar ISO 14443-A.

ANEXO D. DISTRIBUCIÓN NORMAL Y BINOMIAL

Al realizar un experimento Bernoulli n veces con una probabilidad p de éxito, la cantidad de éxitos obtenidos seguirá una distribución binomial.

Basado en (Ross, 2002) se tiene que la distribución binomial equivale a una distribución normal discreta para n suficientemente grande. Por lo que se tiene el siguiente resultado:

$$X \sim \text{Binomial}(n, p)$$

$$E[X] = np \quad \text{Var}[X] = np(1 - p)$$

Pero X representa la cantidad de éxitos. Por lo tanto usando $Y = X/n$ se representa una estimación de p .

$$E[Y] = E[X/n] = \frac{np}{n} = p$$

$$\text{Var}[Y] = \text{Var}[X/n] = \frac{np(1 - p)}{n^2} = \frac{p(1 - p)}{n}$$

La varianza más grande se da con $p = 0,5$.

$$\frac{d}{dp} \left(\frac{p \cdot (1 - p)}{n} \right)$$

$$\frac{d}{dp} \left(\frac{p}{n} - \frac{p^2}{n} \right)$$

$$= \frac{1}{n} - \frac{2p}{n} = 0$$

$$\Rightarrow 1 - 2p = 0 \Rightarrow p = 0,5$$

La desviación estándar de Y es

$$\sigma_Y = \sqrt{\text{Var}[Y]} = \sqrt{\frac{p(1 - p)}{n}}$$

Se requieren resultados con un nivel de confianza del 95%, es decir, que exista una probabilidad de 95% que el resultado más el rango definido por el margen de error contenga el valor real de la probabilidad de detección. Para una distribución normal, un margen de error de $\pm\sigma$ entrega un nivel de confianza de 68,2% y un margen de error de $\pm 2\sigma$ entrega un nivel de confianza de 95,4% (Figura D.1 extraída de (*Wikipedia - Normal distribution*, 2008)). Por lo tanto, el margen de error de los resultados experimentales sería de:

$$\pm 2\sigma = \pm 2\sqrt{\frac{p(1 - p)}{n}}$$

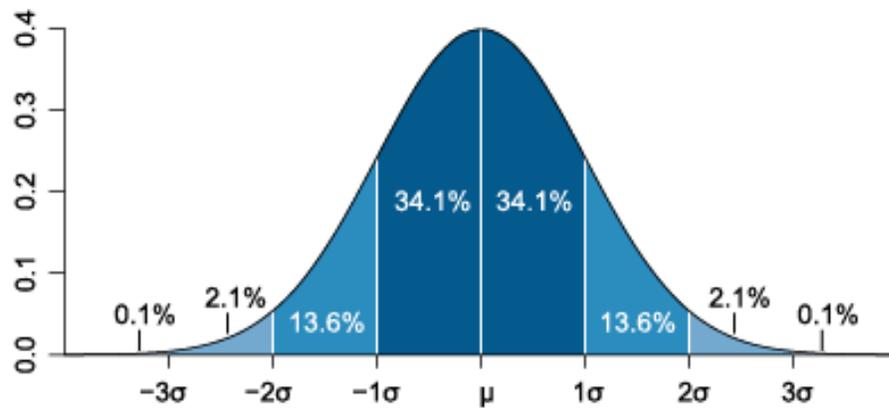


FIGURA D.1. Distribución normal y desv. standard - Niveles de significancia (Wikipedia - Normal distribution, 2008).

ANEXO E. VELOCIDAD DE LECTURA DEL EQUIPO SIRIT IN510

E.1. Multiplexación de antenas

La primera medición de velocidad consistió en colocar 2 tarjetas a 1 m de la antena lectora, adquiriendo datos por 3 segundos, $Q_{inicial} = 2$. El resultado es que al usar 1, 2, 3 y 4 antenas se registran 390, 254, 255, 247 lecturas/segundo respectivamente. Lo anterior muestra que existe una disminución del desempeño al utilizar más de una antena, y que ésta se debe al tiempo perdido en la multiplexación.

E.2. Efecto del número de tags y $Q_{inicial}$

La segunda prueba consistió en testear la velocidad frente a configuración del parámetro $Q_{inicial}$ del algoritmo de anticollisión aloha ranurado. Las series de la Figura E.1 presentan diferentes números de tags y en ella se grafican las tasas de lectura resultantes a diferentes $Q_{inicial}$ usando una sola antena. Se aprecia que existe un efecto importante del número de slots inicial. De los resultados se deduce que $Q_{inicial}$ es uno de los parámetros más importantes de ajustar correctamente, para lograr una óptima tasa de lectura.

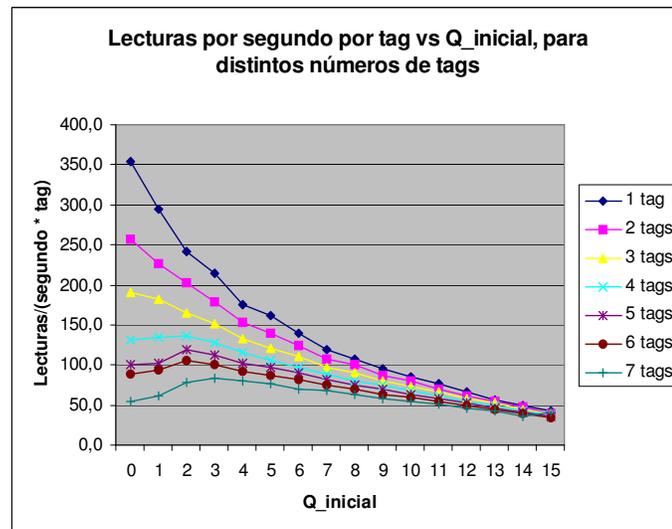


FIGURA E.1. Lecturas por segundo por tag para 1 antena, diferentes $Q_{inicial}$ y diferente número de tags.

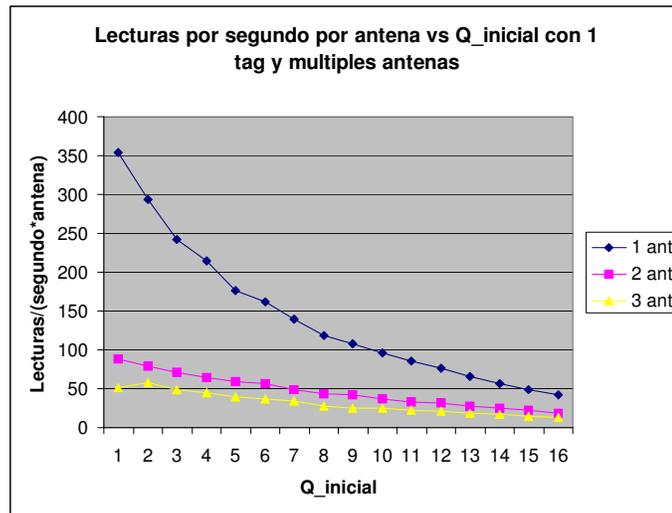


FIGURA E.2. Lecturas por segundo por tag para diferentes $Q_{inicial}$ con 1, 2 y 3 antenas.

E.3. Efecto conjunto de la multiplexación y valor de $Q_{inicial}$

En la tercera prueba se colocaron en la sala 3 antenas, a cada una se le presentó un tag a 1 m verificando que no existieran lecturas cruzadas (una antena leyendo un tag correspondiente a otra antena). La Figura E.2 presenta las tasas de lectura resultantes al usar 1, 2 y 3 antenas con un tag cada una. El resultado muestra nuevamente que existe una perdida de capacidad de lectura al usar más de una antena, pero que usar más de dos antenas no tiene un efecto directo en la tasa de lectura. Además se muestra que el switching entre antenas se hace más lento al aumentar $Q_{inicial}$ (Figura E.3), lo que perjudicaría la capacidad de lectura de un portal multi-antena en condiciones de mala exposición de los tags y obstrucciones importantes de las señales.

E.4. Cantidad de lecturas al pasar por un portal

En los experimentos se utilizara $Q_{inicial} = 2$. Para ese valor la tasa de lectura es de unos 150 lect/seg al tener 1 tag y 4 antenas, resultando así en 37,5 lect/seg/antena. En la figura E.4 se aprecia que a 20 cm de la antena la apertura es de 89,28 cm. Por lo tanto con una velocidad de caminata de 5 km/h (1,38 m/s) se tiene que el caminante estará expuesto a la señal de la antena por 0,647 s. Así, con una tasa de lectura por antena de 37,5 lect/seg, el tag se podrá leer unas 25 veces por antena.

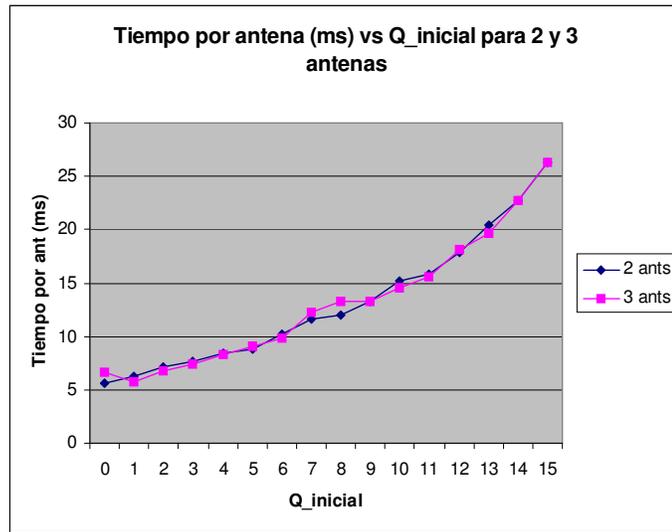


FIGURA E.3. Segundos por antena para diferentes $Q_{inicial}$ con 2 y 3 antenas.

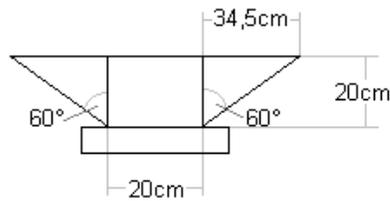


FIGURA E.4. Cálculo de la apertura de la antena a 20cm de la antena

ANEXO F. DISEÑO DE PORTAL

Los buses troncales del Transantiago tienen puertas de 2.10m de alto por 1.15m de ancho. Se requiere un portal que permita distintas configuraciones de altura, posición y orientación de las antenas en los experimentos de emulación de puerta. Además el montaje debería ser sencillo de transportar, para poder hacer mediciones en diferentes lugares.

El diseño del portal se aprecia en las figuras F.1, F.2 y F.3. Las piezas usadas son:

- (i) 1 plancha MDF 18mm x 40cm x 115cm
- (ii) 2 planchas MDF 15mm x 40cm x 210cm
- (iii) 1 plancha MDF 15mm x 40cm x 118cm
- (iv) 4 vigas pino cepillado 2" x 2" x 40cm

Para unir las planchas que componen el portal se utilizaron:

- 4 golillas 3/8" (base)
- 24 golillas 1/4"
- 4 pernos coche 3/8" x 3" (base)
- 12 pernos hexagonal 1/4" x 3"
- 4 tuercas mariposa 3/8" (base)
- 12 tuercas mariposa 1/4"

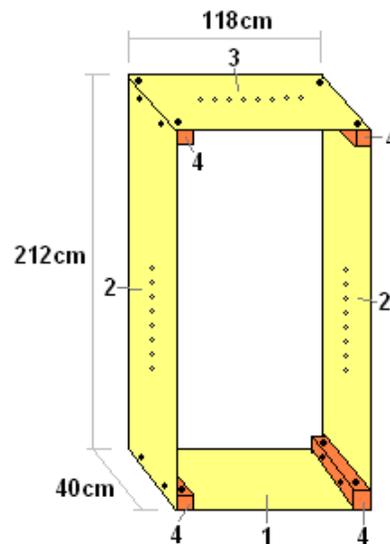


FIGURA F.1. Portal completo

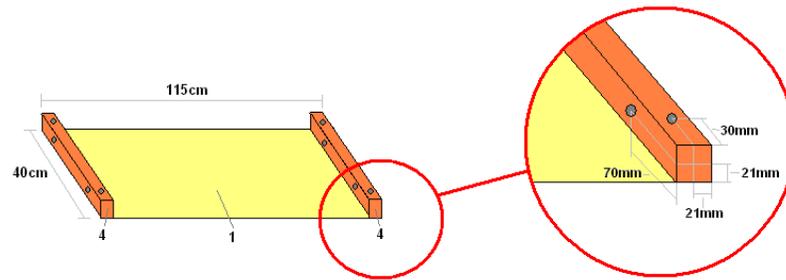


FIGURA F.2. Piso portal

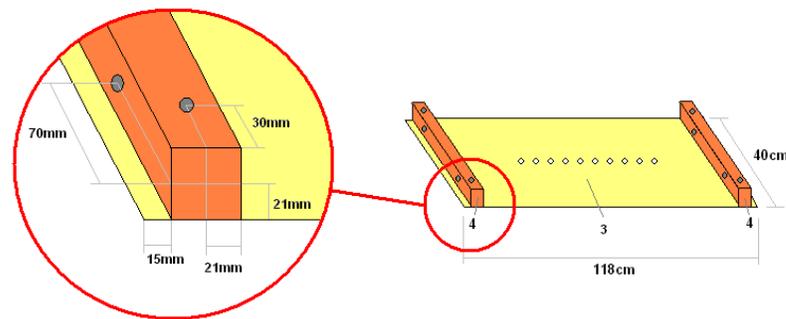


FIGURA F.3. Techo portal

Para sostener las antenas al portal se usaron:

- 8 pernos hexagonales M6 x 30mm (2 por antena)
- 8 golillas 1/4" (2 por antena)

ANEXO G. EXPERIMENTOS DE PARADERO

Los siguientes experimentos no fueron realizados y pueden ser usados en futuras investigaciones. El objetivo de estos experimentos es calificar el desempeño del equipo para contabilizar personas circulando en un espacio físico delimitado.

G.1. Tasa de lectura y detección en un paradero

Este experimento pretende generar una mapa de la tasa de detección de las tarjetas en una sala/paradero.

En una sala de 8m de largo por 7m de ancho se colocará una antena en el centro, apuntando desde el techo. Los participantes se formarán según la figura G.1. Si los participantes se quedarán quietos la medición no sería tan provechosa, podrían estar justo en un punto que no tiene buena señal, debido al scattering, efecto rayleigh, multi-trayectorias (tal como se aprecia en la figura G.2, extraída de (Dobkin, 2007)), por lo tanto se deberán mover ligeramente, dando vueltas en el lugar y desplazándose 50 cm en las cuatro direcciones. Además portarán las tarjetas en uno de los 4 modos definidos (mano, bolsillo, billetera, mochila).

La idea es que las tarjetas que se leen más veces están en presencia de un campo más fuerte. Por lo tanto se hará un histograma en 3D. Conociendo la posición de cada participante, con lo que obtendrá un gráfico de superficie similar al de la Figura G.2, pero de menor resolución.

G.2. Llegadas y embarques en un paradero

En una sala de 8 m de largo por 7 m de ancho se montan las antenas en 2 configuraciones, se debe repetir el procedimiento del experimento por cada una de ellas.

- Cuatro antenas concentradas en el centro de la sala puestas en el techo.
- Cuatro antenas distribuidas en los extremos de la sala, también en el techo.

A la indicación de un sonido emitido por el computador, con una distribución poisson/exponencial irán entrando los participantes a la sala.

Luego de otro tiempo exponencial se dará la indicación de que llegó el bus, por lo que la gente irá saliendo de la sala rápidamente.

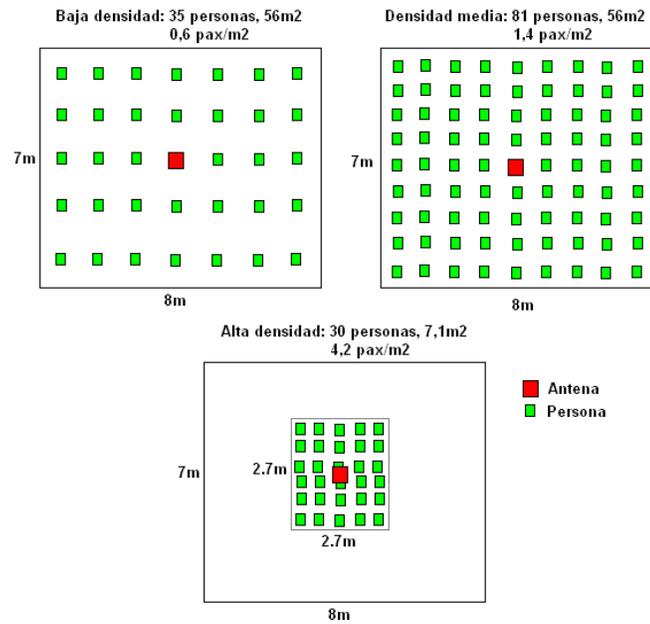


FIGURA G.1. Experimento en sala emulando paradero, para evaluar desempeño

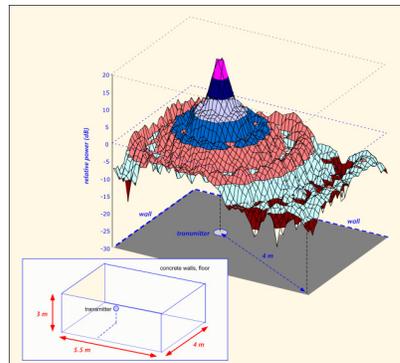


FIGURA G.2. Modelo simple de campo radiado en UHF dentro de una sala

Una modificación puede ser que cada persona tenga un tiempo límite de espera, y al cumplirse dejará la sala, si es que no ha pasado la micro antes.

Otra modificación consiste en realizar el experimento en un paradero real, colocándole calcomanías a las tarjetas de la gente que llegue al paradero. Una alternativa interesante sería probar la solución en un paradero cerrado (zona paga), así los monitores le pegan la calcomanía a la gente que llegue.

G.3. Conteo de pasajeros en un bus desde el paradero

Se colocan antenas a la altura de las ventanas del bus, a la salida del paradero (Figura G.3). De tal forma que cuando el bus se disponga a abandonar la parada, el lector se active y comience a leer las tarjetas de las personas que están dentro del bus. Una estructura será necesaria para alojar al lector y sostener las antenas a la altura correcta. Además sería útil algún sistema que indicara que el bus está partiendo para que el sistema no esté encendido constantemente. Puede haber un problema con la diferencia de altura de buses alimentadores y troncales. Pero en los paraderos principales las zonas de detención de cada uno están separadas. Seguramente utilizando tags pasivos UHF Gen 2 este experimento tendría una tasa de detección cercana a 0%. Por lo tanto se deberían hacer las pruebas con tags pasivos UHF Gen 2 (PowerID, 2008). En ese caso tampoco se puede asegurar un nivel de detección del 100% debido al alto grado de absorción de las señales UHF por metales, cuerpo humano y agua.

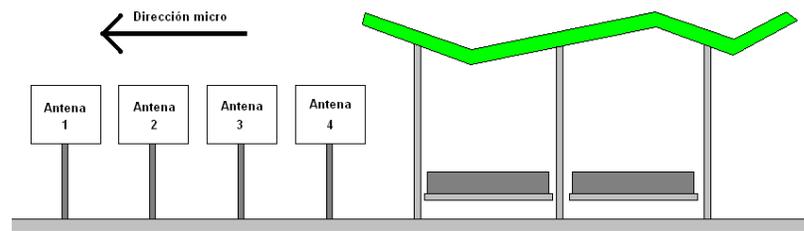


FIGURA G.3. Localización de las antenas en conteo de pasajeros en bus desde paradero

Se puede variar la posición de las antenas, para comprobar de que manera se obtienen más lecturas. La Figura G.4 muestra una configuración alternativa.

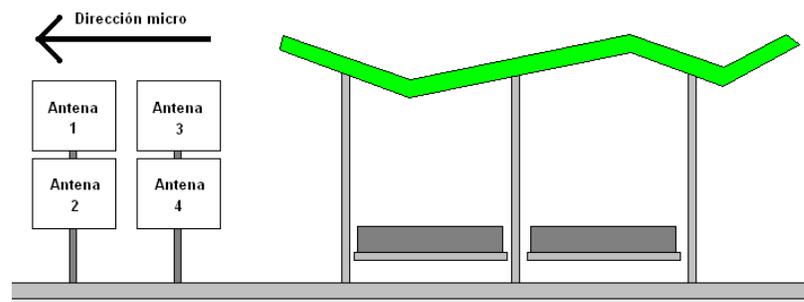


FIGURA G.4. Localización alternativa de las antenas en conteo de pasajeros en bus desde paradero

Además se puede analizar cual es la multiplexación de antenas más adecuada. La secuencia básica 1234 se puede modificar otorgándole preponderancia a alguna de las antenas.

ANEXO H. DATOS EXPERIMENTALES TARJETA EN MANO (H)

TABLA H.1. Detección de pasadas por el portal, tarjetas duales en H

Antenas	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
	315 pasadas	285 pasadas	300 pasadas	300 pasadas
☐	76	107	65	88
▣	78	112	49	96
▤	213	214	157	237
* ▥	247	236	233	181
▦	107	143	80	115
▧	219	222	169	224
▨	223	229	166	243
▩	252	243	240	198
▪	253	239	235	185
* ▫	301	275	266	266
▬	226	231	174	248
▭	256	244	241	199
▮	303	278	270	267
* ▯	303	277	271	271
▰	304	278	271	272

TABLA H.2. Detección de pasadas por el portal, tarjetas simples en H

Antenas	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
	315 pasadas	285 pasadas	300 pasadas	300 pasadas
☐	186	179	167	157
☐	167	166	141	164
☐	269	235	239	254
*☐	288	264	268	249
☐	221	208	190	192
☐	281	242	245	263
☐	275	249	250	265
☐	294	268	273	261
☐	291	266	275	253
*☐	307	283	285	277
☐	286	252	253	267
☐	297	269	277	261
☐	310	284	291	280
*☐	309	283	287	282
☐	312	284	291	282

TABLA H.3. Lecturas por pasada, tarjetas duales en H

Antena	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
☐	3,4	5,9	3,0	5,0
☐	3,0	5,3	1,9	5,2
☐	11,7	14,4	7,5	15,7
☐	14,6	15,5	13,0	9,7

TABLA H.4. Lecturas por pasada, tarjetas simples en H

Antena	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
☐	9,7	10,5	8,4	9,4
☐	8,2	9,0	6,6	9,7
☐	20,9	22,9	14,7	20,5
☐	23,8	22,8	21,7	18,9

ANEXO I. DATOS EXPERIMENTALES TARJETA EN BILLETERA DENTRO DE LA MOCHILA (WB)

TABLA I.1. Detección de pasadas por el portal, tarjetas duales en WB

Antenas	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
	105 pasadas	95 pasadas	100 pasadas	100 pasadas
☐	90	84	53	80
▣	69	82	85	80
▤	86	79	45	85
* ▥	76	65	92	73
▦	96	90	87	94
▧	99	89	56	94
▨	93	94	87	92
▩	97	84	93	95
▪	86	88	98	86
* ▫	92	84	93	90
▬	99	95	87	95
▭	97	90	98	95
▮	95	94	93	95
* ▯	99	89	98	92
▰	99	95	98	95

TABLA I.2. Detección de pasadas por el portal, tarjetas simples en WB

Antenas	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
	105 pasadas	95 pasadas	100 pasadas	100 pasadas
☐	95	82	79	99
☐	88	82	85	88
☐	89	72	66	87
*☐	86	74	84	80
☐	95	87	88	100
☐	95	83	81	100
☐	92	84	86	94
☐	99	85	89	100
☐	95	84	90	91
*☐	94	76	86	92
☐	95	87	88	100
☐	99	87	92	100
☐	96	84	91	96
*☐	99	85	89	100
☐	99	87	92	100

TABLA I.3. Lecturas por pasada, tarjetas duales en WB

Antena	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
☐	4,6	6,8	1,9	3,7
☐	3,2	5,3	4,5	4,1
☐	3,5	5,3	1,0	2,7
☐	3,7	3,4	4,4	3,6

TABLA I.4. Lecturas por pasada, tarjetas simples en WB

Antena	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
☐	8,4	7,9	3,2	7,1
☐	6,9	6,0	6,8	6,2
☐	7,3	6,8	2,4	5,0
☐	6,7	5,9	6,2	5,6

ANEXO J. DATOS EXPERIMENTALES EN BILLETERA DENTRO DEL BOLSILLO (WP)

TABLA J.1. Detección de pasadas por el portal, tarjetas duales en WP

Antenas	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
	105 pasadas	95 pasadas	100 pasadas	100 pasadas
☐	0	13	3	2
▣	0	6	5	7
▤	3	32	5	22
* ▥	71	85	96	48
▦	0	16	5	7
▧	3	33	6	23
▨	3	32	6	26
▩	71	85	96	48
▪	71	85	96	48
* ▫	71	85	96	56
▬	3	33	6	26
▭	71	85	96	48
▮	71	85	96	56
* ▯	71	85	96	56
▰	71	85	96	56

TABLA J.2. Detección de pasadas por el portal, tarjetas simples en WP

Antenas	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
	105 pasadas	95 pasadas	100 pasadas	100 pasadas
☐	0	23	4	9
☐	1	24	6	12
☐	12	52	11	38
*☐	95	88	100	60
☐	1	32	9	13
☐	12	52	13	38
☐	13	53	13	40
☐	95	88	100	61
☐	95	88	100	60
*☐	96	89	100	70
☐	13	53	15	40
☐	95	88	100	61
☐	96	89	100	70
*☐	96	89	100	70
☐	96	89	100	70

TABLA J.3. Lecturas por pasada, tarjetas duales en WP

Antena	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
☐	0,0	0,3	0,0	0,0
☐	0,0	0,1	0,2	0,2
☐	0,0	0,8	0,1	0,6
☐	2,8	5,3	5,1	2,2

TABLA J.4. Lecturas por pasada, tarjetas simples en WP

Antena	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
☐	0,0	0,5	0,0	0,4
☐	0,0	0,6	0,1	0,3
☐	0,3	2,0	0,1	1,1
☐	5,1	7,6	5,2	2,4

ANEXO K. DATOS EXPERIMENTALES TARJETA SUELTA EN EL BOLSILLO (LP)

TABLA K.1. Detección de pasadas por el portal, tarjetas duales en LP

Antenas	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
	105 pasadas	95 pasadas	100 pasadas	100 pasadas
☐	0	6	3	0
◻	0	6	0	0
◻	2	12	6	24
* ◻	53	75	96	37
◻	0	7	3	0
◻	2	12	6	24
◻	2	13	6	24
◻	53	75	96	37
◻	53	75	96	37
* ◻	54	75	96	43
◻	2	13	6	24
◻	53	75	96	37
◻	54	75	96	43
* ◻	54	75	96	43
◻	54	75	96	43

TABLA K.2. Detección de pasadas por el portal, tarjetas simples en LP

Antenas	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
	105 pasadas	95 pasadas	100 pasadas	100 pasadas
☐	3	46	17	12
☐	0	34	21	21
☐	14	74	31	41
*☐	99	95	98	66
☐	3	59	27	29
☐	15	77	33	42
☐	14	80	35	45
☐	99	95	98	67
☐	99	95	98	67
*☐	100	95	98	69
☐	15	83	36	46
☐	99	95	98	68
☐	100	95	98	70
*☐	100	95	98	70
☐	100	95	98	71

TABLA K.3. Lecturas por pasada, tarjetas duales en LP

Antena	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
☐	0,0	0,2	0,0	0,0
☐	0,0	0,2	0,0	0,0
☐	0,0	0,4	0,1	0,3
☐	1,8	3,8	3,4	1,0

TABLA K.4. Lecturas por pasada, tarjetas simples en LP

Antena	Una fila		Dos filas	
	Mujeres	Hombres	Derecha	Izquierda
☐	0,0	1,1	0,2	0,2
☐	0,0	0,7	0,3	0,3
☐	0,2	2,7	0,8	1,2
☐	4,1	7,6	5,6	3,1

ANEXO L. MEMORIA DE CÁLCULO - DATOS POR TARJETA

Los datos obtenidos en cada experimento quedaron almacenados en archivos de texto:

- “01.WBdo_f.txt”: Tarjetas duales en la billetera dentro de la mochila y tarjetas simples en la mano, caminando en una fila.
- “02.WBso_f.txt”: Tarjetas simples en la billetera dentro de la mochila y tarjetas duales en la mano, caminando en una fila.
- “03.WPso_f.txt”: Tarjetas simples en la billetera dentro del bolsillo trasero derecho del pantalón y tarjetas duales en la mano, caminando en una fila.
- “04.WPdo_f.txt”: Tarjetas duales en la billetera dentro del bolsillo trasero derecho del pantalón y tarjetas simples en la mano, caminando en una fila.
- “05.LPdo_f.txt”: Tarjetas duales sueltas en bolsillo trasero derecho del pantalón y tarjetas simples en la mano, caminando en una fila.
- “06.LPso_f.txt”: Tarjetas simples sueltas en bolsillo trasero derecho del pantalón y tarjetas duales en la mano, caminando en una fila.
- “07.LPdt_f.txt”: Tarjetas duales en bolsillo trasero derecho del pantalón y tarjetas simples en la mano, caminando en dos filas.
- “08.LPst_f.txt”: Tarjetas simples en bolsillo trasero derecho del pantalón y tarjetas duales en la mano, caminando en dos filas.
- “09.WPst_f.txt”: Tarjetas simples en la billetera dentro del bolsillo trasero derecho del pantalón y tarjetas duales en la mano, caminando en dos filas.
- “10.WPdt_f.txt”: Tarjetas duales en la billetera dentro del bolsillo trasero derecho del pantalón y tarjetas simples en la mano, caminando en dos filas.
- “11.WBdt_f.txt”: Tarjetas duales en la billetera dentro de la mochila y tarjetas simples en la mano, caminando en una fila.
- “12.WBst_f.txt”: Tarjetas simples en la billetera dentro de la mochila y tarjetas duales en la mano, caminando en una fila.

En cada uno de esos archivos se registran las lecturas realizadas por el equipo y algunos mensajes adicionales. A continuación, a modo de ejemplo aparece un extracto del archivo 01.WBdo_f.txt:

```
event.status.tag_collision tag_type=ISOC
event.status.tag_collision tag_type=ISOC
event.status.tag_collision tag_type=ISOC
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAD027, type=ISOC,
```

```

antenna=3, time=2008-06-13T14:25:10.435
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAE027, type=ISOC,
antenna=3, time=2008-06-13T14:25:10.436
event.status.inventory_end tag_type=ISOC, total_slots=14,
empty_slots=11
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAD027, type=ISOC,
antenna=2, time=2008-06-13T14:25:10.442
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAE027, type=ISOC,
antenna=2, time=2008-06-13T14:25:10.444
event.status.inventory_end tag_type=ISOC, total_slots=7,
empty_slots=5
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAD027, type=ISOC,
antenna=4, time=2008-06-13T14:25:10.449
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAE027, type=ISOC,
antenna=4, time=2008-06-13T14:25:10.450
event.status.inventory_end tag_type=ISOC, total_slots=7,
empty_slots=5
event.status.tag_collision tag_type=ISOC
event.status.tag_collision tag_type=ISOC
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAD027, type=ISOC,
antenna=1, time=2008-06-13T14:25:10.464
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAE027, type=ISOC,
antenna=1, time=2008-06-13T14:25:10.466
event.status.inventory_end tag_type=ISOC, total_slots=10,
empty_slots=8
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAE027, type=ISOC,
antenna=3, time=2008-06-13T14:25:10.485
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAD028, type=ISOC,
antenna=3, time=2008-06-13T14:25:10.486
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAD027, type=ISOC,
antenna=3, time=2008-06-13T14:25:10.487
event.status.inventory_end tag_type=ISOC, total_slots=8,
empty_slots=5
event.tag.depart tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAE034

```

La interpretación de cada una de las líneas se da a continuación.

El siguiente mensaje indica que el lector detectó una colisión en alguno de los espacios de tiempo disponibles en la ronda de lectura del algoritmo aloha ranurado.

```

event.status.tag_collision tag_type=ISOC

```

El siguiente mensaje indica que hubo una lectura de tag exitosa, el ID de ese tag es AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAD027, el tipo de tag es ISO 18000-6C (equivalente a EPC Gen 2), la antena lectora es la número 3 y el instante de la lectura fue el 13 de Junio de 2008 a las 14:25 con 10,435 segundos.

```
event.tag.report tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAD027, type=ISOC,  
antenna=3, time=2008-06-13T14:25:10.435
```

Las antenas están numeradas de 1-4. Antena 1 es , antena 2 es , antena 3 es y antena 4 es .

El ID de cada tag está compuesto por 24 caracteres hexadecimales. Los tags usados empiezan con 20 A's y luego una letra; D indica que la tarjeta es dual y E indica que la tarjeta es simple. Después de la letra hay un número de 3 cifras que indica el número de tarjeta. Cada persona lleva una tarjeta dual y una simple con el mismo número, por ejemplo D015 y E015.

El siguiente mensaje indica que la ronda de lectura de la antena mencionada ha terminado. En total existieron 10 espacios de tiempo para que los tags respondan y dos de ellos fueron utilizados, quedando 8 espacios vacíos.

```
event.status.inventory_end tag_type=ISOC, total_slots=10,  
empty_slots=8
```

El orden de la fila al realizar los experimentos no fue 100% correlativo. En los experimentos de una fila la secuencia es: 29, 28, ...,3, 2, 1, 30, 31, ..., 40, 41. En los experimentos de dos filas la secuencia de la fila derecha es: 29, 28, ..., 12, 11, 2. Y la secuencia de la fila izquierda es: 30, 31, ..., 40, 41, 10, 9, ..., 4, 3.¹

Al final de los archivos hay un resumen de algunas configuraciones del software y del equipo. Por ejemplo en 01.WBdo_f.txt aparece lo siguiente:

```
***Duracion: 04:51  
@@@Numero rounds: 33277  
///mano roja, mochila negra  
$$$Eventos registrados:  
$$$Tag report (heavy), true  
$$$Inventory end (heavy), true  
$$$Tag collision, true  
$$$Tag loss of signal, true  
$$$Tag no EPC, true  
$$$Tag bad CRC, true
```

¹Notar que el participante número 1 no aparece. Eso se debe a que eran 41 participantes y al estar en dos fila debían caminar en pareja, ese participante caminaba solo y por eso no fue contabilizado al procesar las estadísticas.

```

<suds>
<property name="antennas.mux_sequence" value="1324"/>
<property name="antennas.1.advanced.computed_conducted_power"
value="307"/>
<property name="antennas.2.advanced.computed_conducted_power"
value="307"/>
<property name="antennas.3.advanced.computed_conducted_power"
value="320"/>
<property name="antennas.4.advanced.computed_conducted_power"
value="320"/>
<property name="modem.protocol.isoc.control.number_slots_q"
value="2"/>
<property name="modem.protocol.isoc.control.max_incr_slots_q"
value="15"/>
<property name="modem.protocol.isoc.control.select_cmd_period"
value="1"/>
<property name="modem.protocol.isoc.control.session_id"
value="session_1"/>
<property name="tag.reporting.depart_time" value="10000"/>
</suds>}

```

Recordando que en cada serie del experimentos los participantes daban cinco vueltas, entrando por el portal y saliendo de la sala por una segunda puerta, queda claro que en cada archivo de registro de los experimentos las lecturas totales de un tag determinado (ejemplo D034) corresponden en realidad a 5 repeticiones del experimento de pasar por una portal. Para marcar una separación entre cada repetición se utilizó un mensaje del lector que aparecía 10 segundos (10.000 ms) después de la última lectura del tag. Recordando que el largo de cada vuelta a la sala era de 30 y 50 segundos, el espacio de tiempo de 10 segundos es suficiente para separar los conteos. A continuación se muestra la configuración de ese parámetro y un ejemplo del reporte generado por el lector:

```

<property name="tag.reporting.depart_time" value="10000"/>
event.tag.depart tag_id=0xAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAE034

```

Los archivos de registro pueden ser procesados por un software relativamente sencillo para obtener las estadísticas asociadas a cada tarjeta en los experimentos realizados. Además luego se pueden agrupar esos datos individuales para generar estadísticas de desempeño más generales, como las presentadas en el Capítulo 4. El procesamiento manual de los datos no es recomendable, pero en un intento de ilustrar mejor la forma de clasificar los datos se incluye en las Tablas L.1 y L.2, con estadísticas individuales por cada

tarjeta del archivo “10.WPdt-f.txt”. En esa tabla se incluye información sobre número de tarjeta, género del portador de la tarjeta, fila en la que caminaba el participante, altura de su bolsillo trasero derecho y luego se tienen los datos de número de lecturas por cada una de las 4 antenas en cada una de las vueltas. Por ejemplo, la tarjeta D002 fue llevada por un participante masculino, que caminó por la fila derecha, la altura de su bolsillo es de 71 cm del suelo y además:

TABLA L.1. Estadísticas por tag, WP, dos filas, tarjetas duales - Parte I

Tarjeta	Género	Fila	Altura bolsillo	Lecturas por repetición				
				1	2	3	4	5
D002	M	derecha	71	01 515	813 932	216 026	23 419	014 1330
D003	M	izquierda	74	00 00	00 014	00 014	00 00	00 00
D004	F	izquierda	67	00 023	00 021	00 020	00 023	00 018
D005	M	izquierda	69	00 62	00 70	00 08	00 00	00 10
D006	F	izquierda	72	00 00	00 02	00 06	00 00	00 00
D007	M	izquierda	69	00 010	00 08	00 021	00 817	00 912
D008	F	izquierda	70	00 03	00 00	00 05	00 03	00 04
D009	F	izquierda	74	00 00	00 00	00 00	00 00	00 00
D010	M	izquierda	77	00 90	00 110	00 120	00 120	00 130
D011	F	derecha	76	00 08	00 09	00 09	00 011	00 012
D012	F	derecha	78	00 018	00 014	00 016	00 020	00 027
D013	F	derecha	73	00 012	00 08	00 016	00 011	00 011
D014	F	derecha	62	00 010	00 013	00 014	00 08	00 07
D015	M	derecha	77	00 017	00 020	00 022	00 015	00 017
D016	M	derecha	75	00 08	00 08	00 017	00 08	00 07
D017	F	derecha	70	00 010	00 015	00 011	00 012	00 011
D018	F	derecha	78	00 013	00 010	00 09	00 09	00 014
D019	F	derecha	74	00 010	00 015	00 011	00 015	00 010
D020	F	derecha	62	00 00	00 00	00 00	00 00	00 03
D021	M	derecha	73	00 021	00 016	00 019	00 022	00 022

- (i) En la primera vuelta que dio, su tarjeta fue leída 0 veces por la antena , 1 vez por la antena , 5 veces por la antena y 15 veces por la antena .
- (ii) En la segunda vuelta que dio, su tarjeta se leyó 8 veces por , 13 por , 9 por y 32 por .
- (iii) En la tercera vuelta que dio, su tarjeta se leyó 2 veces por , 16 por , 0 por y 26 por .

TABLA L.2. Estadísticas por tag, WP, dos filas, tarjetas duales - Parte II

Tarjeta	Género	Fila	Altura bolsillo	Lecturas por repetición				
				1	2	3	4	5
D022	M	derecha	73	00 0 16	00 0 21	00 0 21	00 0 20	00 0 22
D023	F	derecha	70	00 0 12	00 0 12	00 0 12	00 0 17	00 0 10
D024	M	derecha	76	00 0 21	00 0 26	00 0 14	00 0 14	00 0 17
D025	M	derecha	72	00 0 14	00 0 21	00 0 15	00 0 15	00 0 15
D026	F	derecha	75	00 0 15	00 0 19	00 0 19	00 0 20	00 0 21
D027	M	derecha	75	00 0 21	00 0 17	00 0 23	00 0 22	00 0 22
D028	M	derecha	68	00 0 9	00 0 24	00 0 12	00 0 14	00 0 22
D029	M	derecha	76	00 0 17	00 0 28	00 3 21	00 0 20	00 0 26
D030	M	izquierda	76	00 2 23	7 10 0 33	0 1 0 24	0 12 0 32	0 13 0 26
D031	F	izquierda	74	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 8	00 0 0
D032	F	izquierda	80	00 0 0	00 0 14	00 0 21	00 0 0	00 0 20
D033	F	izquierda	78	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0
D034	F	izquierda	72	00 0 4	00 0 14	00 0 0	00 0 1	00 0 2
D035	M	izquierda	78	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0
D036	M	izquierda	70	00 5 0	00 10 17	00 5 4	00 7 16	00 2 12
D037	F	izquierda	75	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0
D038	F	izquierda	80	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 2
D039	M	izquierda	69	05 15 17	00 11 16	44 13 16	00 8 19	04 16 8
D040	M	izquierda	76	00 0 11	00 0 17	00 0 6	00 2 16	00 0 12
D041	F	izquierda	77	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0	00 0 0

- (iv) En la cuarta vuelta que dio, su tarjeta se leyó 2 veces por \square , 3 por \square , 4 por \square y 19 por \square .
- (v) En la quinta vuelta que dio, su tarjeta se leyó 0 veces por \square , 14 por \square , 13 por \square y 30 por \square .

Los datos anteriores permiten calcular estadísticas individuales para la tarjeta D002 al estar dentro de una billetera en el bolsillo de un hombre a una altura de 72 cm. Se pueden obtener estadísticas sobre la cantidad promedio de lecturas de cada pasada por el portal, separada por antenas. La antena \square leyó 0 veces en la primera vuelta, 8 veces en la segunda, 2 en la tercera, 2 en la cuarta y 0 en la quinta, lo que da un total de 12 lecturas y un promedio de $12/5 = 2,4$ lecturas por vuelta. También se pueden calcular estadísticas de detección, en este caso la tarjeta debe ser leída por lo menos una vez en una vuelta cualquiera para considerarse detectada. La tarjeta D002 fue detectada por la antena \square 3/5 de las veces, por la antena \square 5/5, antena \square 4/5 y antena \square 5/5. Además, al evaluar

las detecciones de las antenas \square y \square en conjunto (\blacksquare) se alcanzan 5/5. Si se calculan estas estadísticas para cada una de las 15 combinaciones de antenas y para cada uno de los tags, luego, agrupando los valores individuales se pueden obtener valores generales de desempeño como los presentados en las tablas del Capítulo 4.

En un DVD adjunto a esta tesis se encuentran tablas similares a las Tablas L.1 y L.2 para cada uno de los experimentos realizados, lo que permite reproducir cualquiera de las estadísticas presentadas en esta tesis. Además, en dicho DVD se encuentra una tabla que permite generar cada uno de los histogramas requeridos para la simulación computacional mencionados en la Sección 4.5.