

Jose Luis Yubero Yubero  
Richard-Wagner Straße 31  
D-18119 Rostock (Warnemünde)

**Alineamiento de interferencias  
basado en relés en redes inalámbricas  
multi-usuario**

**(Interference Alignment  
aided by relays for multiuser wireless networks)**

Proyecto Fín de Carrera

para obtener el título de  
**Diplomado**  
en la Fakultät für Elektrotechnik und Informatik  
Universität Rostock

presentado por  
Jose Luis Yubero Yubero  
nacido el 29.01.1985 en Madrid (España)

Supervisores: Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Weber  
M.Sc. Hussein Al-Shatri

Rostock, 30. Marzo 2012

# **Declaración**

Declaro que he realizado este proyecto por mí mismo y he usado la documentación especificada en este texto.

Rostock, 30. Marzo de 2012

## **Agradecimientos**

Me gustaría agradecer al Doctor Tobias weber y al investigador Hussein al-Shatri el haberme permitido trabajar con ellos en el Proyecto final de carrera sobre el tema Alineación de Interferencias, una técnica dedicada a reducir el efecto de las interferencias en las comunicaciones móviles.

También, me gustaría dar las gracias a la Univrsidad de Rostock por concederme la oportunidad de estudiar en Alemania.

## **Dedicatoria**

*Me gustaría dedicar este trabajo a mi familia: Jose Luis, mi padre, Isabel, mi madre; y Fernando, mi hermano.*

*También me gustaría dedicárselo a alvaro, una persona muy importante para mí.*

*Gracias a todos por vuestro apoyo y ayuda en todo momento.*

# Indice

<b>1</b>	<b>Abstracto</b>	<b>pág. 6</b>
<b>2</b>	<b>Motivación</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Introducción</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Estructura</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Capítulo 1: Modelo del sistema</b>	<b>18</b>
	<b>1.1 Alineamiento de interferencias (IA)</b>	<b>18</b>
	<b>1.2 Conceptos y parámetros</b>	<b>19</b>
	<b>1.3 Modelo del sistema</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Capítulo 2: IA usando relays</b>	<b>22</b>
	<b>2.1 Distintos esquemas</b>	<b>22</b>
	<b>2.2 Relé con una única antena</b>	<b>23</b>
	<b>2.3 Relé equipado con varias antenas</b>	<b>26</b>
	<b>2.4 Varios relés equipados con varias antenas</b>	<b>28</b>
	<b>2.5 Esquema general</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Capítulo 3: Energía necesaria para lograr IA</b>	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Chapter 4: Rendimiento total del sistema</b>	<b>36</b>
	<b>4.1 Teorema de Shannon-Hartley</b>	<b>36</b>
	<b>4.2 Tasa total</b>	<b>37</b>
<b>9</b>	<b>Capítulo 5: Simulaciones</b>	<b>40</b>
<b>10</b>	<b>Capítulo 6: Conclusiones</b>	<b>44</b>
<b>11</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>45</b>

## **ABSTRACTO**

Uno de los problemas actuales en redes inalámbricas son las interferencias, las cuales causan que las transmisiones de información no son tan precisas como nos gustaría.

Hoy en día, hay muchos métodos para mitigar este problema con más o menos eficacia, y nuevos métodos en desarrollo que procuran mejorar y simplificar las redes inalámbricas.

Una de esas técnicas es la conocida como *Alineamiento de Interferencias (IA)*. IA es un método que persigue una eficiente transmisión entre usuarios, mediante la división del espacio que ocupa la señal en dos partes (sub-espacios). Uno de ellos, se utiliza para la señal útil, mientras que el segundo se utilizará para la alineación de interferencias, logrando la máxima capacidad posible para la señal útil en una comunicación inalámbrica.

IA es un gran método para el manejo de interferencias en un canal de comunicaciones. Recientes tests han demostrado incluso con una alta relación señal-ruido (SNR), es capaz de lograr hasta la mitad de capacidad para señal útil que habría en un canal libre de interferencias.

En este trabajo analizaremos estos parámetros, como se comporta el sistema y como alcanza la máxima capacidad del canal utilizado.

Hay diferentes planteamientos usando esta tecnología. En las próximas páginas los compararemos entre sí y analizaremos su eficacia y cual de ellos consigue mayor rendimiento.



## MOTIVACION

Hace algunos años, Las telecomunicaciones básicas era más que suficiente para satisfacer áreas como salud, trabajo, relaciones entre personas, tiempo libre..y podían llevarse a cabo mediante telefonía fija, televisión o con un PC con conexión a internet.

Hoy, las tecnologías han mejorado nuestro día a día de manera muy rápida y rediseñándose para ser algo más importante que una simple comunicación a distancia. Es muy necesaria, no solamente para comunicar a la gente sino también para hacer trabajos más beneficiosos, tiempo libre, viajes...es esencial transmitir o recibir información en cualquier lugar y en cualquier momento, y hoy en día, puede ser llevado a cabo por las telecomunicaciones.

Hoy, esta tecnología ha sido desarrollada y mejorada de tal manera que puede ofrecernos terminales y servicios que no tienen nada que ver con los antiguos. Por ello, los usuarios han renovado sus viejos dispositivos para portátiles y conexiones inalámbrica en casa (WIFI), tienen teléfonos móviles, o incluso Smartphones, lo cuales son lo último en tecnología de terminales.

Todo este progreso ha conseguido que el número de usuarios haya sido incrementado, dado que los costes han sido reducidos. Ello también lleva a que más dispositivos transmiten al mismo tiempo lo que significa mayores interferencias entre ellos. Este es un problema que ha de ser analizado ya que unas comunicaciones limpias son indispensables.

Esta es una demostración que el progreso de las telecomunicaciones hoy está enfocado en transmisiones a través de ondas electromagnéticas.

Por todas estas razones, estoy realmente interesado en trabajar en redes inalámbricas y elegí este proyecto, el cual estudia reducir las interferencias entre



usuarios e investiga la forma de mantener el incremento de calidad en las comunicaciones, satisfaciendo las demandas de nuestra sociedad actual.

## **INTRODUCCIÓN**

Somos seres humanos, y ello nos obliga a desarrollar nuestra actividad diaria en ambientes donde es absolutamente necesario establecer comunicación con otros humanos directamente o incluso usando sistemas de telecomunicación si la distancia entre ellos es lejana.

Al inicio de la “era de las comunicaciones”, se usaba una tecnología basada en cables de cobre. Se desarrolló de tal manera que hoy todavía es rentable su uso para la transmisión de algunas comunicaciones. Consiste en conectar el terminal (como PC, teléfonos..) a otro terminal directamente, si los terminales están suficientemente cerca, o usando otros dispositivos intermedios, si están más lejanos, permitiendo el enrutamiento de la transmisión. Las redes cableadas, todavía se desarrollan hoy, consiguiendo mejoras. La última mejora en estas es la introducción de la fibra óptica reemplazando los cables de cobre en las instalaciones, logrando una alta tasa de transmisión y simplificación del sistema.

Aunque las redes de cables son ampliamente utilizadas hoy en día, desde hace unas décadas se ha ido implementando otra tecnología progresivamente con el paso de los años. Esta es la tecnología inalámbrica, y hoy es más investigada que la primera, llegando incluso a reemplazar a la cableada en muchas situaciones. Estos sistemas que trabajan mediante ondas, están provistos de puertos y/o dispositivos (comúnmente llamados “antenas”) y reciben señales procedentes de otros sistemas, y al mismo tiempo, pueden transmitir ellos mismos.

Las señales que llevan la información son ondas electromagnéticas (también llamadas ondas de radio). Estas señales son filtradas antes de ser transmitidas para adaptarlas al medio donde han de fluir y entonces, una vez recibidas en el destinatario, son filtradas una vez más por el receptor.

También es posible encontrar otros tipos de dispositivos inalámbricos, introducidos en el mercado no muchos años atrás, y que hoy en día también se investigan y mejoran, como por ejemplo Bluetooth, o sistemas de rayos

infrarrojos. Estos sistemas sólo pueden ser usado en entornos cercanos y por ello no se consideran telecomunicaciones, más bien, se consideran simples aplicaciones

Ambos sistemas, tanto cableado como inalámbrico, se investigan y mejoran hoy, porque ninguna de ellas sustituye a la otra, sino que más bien se complementan.

En algunas situaciones donde la portabilidad es absolutamente necesaria como en la telefonía móvil, utilizar un ordenador portátil en diferentes lugares..es mejor disponer de un equipamiento inalámbrico; pero en otras situaciones donde no esta particularidad no es fundamental, los sistemas cableado ofrecen mayores tasas de transmisión, haciéndoles más adecuados (mientras que los cableados de fibra óptica llegan a 2 Gbps, la tecnología inalámbrica alcanza tan sólo 108 Mbps).

Hoy es fácil encontrar estructuras de red mixtas, siendo la parte cableada la principal, permitiendo mayor velocidad; equipada con dispositivos *wireless* para dar de portabilidad al usuario final.

Otra diferencia entre ambos sistemas concierne a las interferencias. Estas son un inconveniente en ambos casos, pero afortunadamente pueden ser tratadas. Aordaremos estos temas en los siguientes capítulos.

Las interferencias en las tecnologías de la comunicación son perturbaciones producidas por señales con la misma o semejantes características, que fluyen en un mismo espacio y entonces, colisionan. Como resultado, se produce un deterioro de la señal y en consecuencia de la información que esta transmite.

Hay tres tipos básicos de de interferencias: eléctricas, radio-frecuencia e intermodulación.

Las interferencias eléctricas afectan a las redes cableadas. Los medios de transmisión son cables y se pueden producir perturbaciones por los electrones que fluyen en dos o más, pero debido a que los cables van cubiertos por una membrana específica que no permite estas “intrusiones”, estas son fácilmente controladas.

También, en este tipo de comunicaciones mediante cable, en redes donde hay multitud de usuarios, es necesario compartir el medio de transmisión, por ejemplo, usando una línea central llamada “bus”. Esta es muy necesaria para simplificar la

estructura, pero tiene un inconveniente, como consecuencia de ello, se pueden producir interferencias cuando dos o más usuarios transmiten al mismo tiempo, y las señales colisionan.

Para redes inalámbricas el mayor inconveniente son las interferencias de radiofrecuencia. Estas son un problema porque los dispositivos siempre comparten el medio de transmisión (el vacío), y se producen cuando dos o más ondas de misma o similar frecuencia se transmiten al mismo tiempo.

Para eliminar las interferencias tanto en sistemas cableados como en inalámbricos, se desarrollan unas técnicas que pueden reducir sus daños.

Una de estas técnicas es conocida como CDMA (Code Division Multiple Access). Este método consiste en asignar un código único para cada par de transmisor-receptor, siendo códigos ortogonales entre ellos de tal forma, es imposible que un receptor confunda su código con el de otro par.

Cada vez que las fuentes transmiten al mismo tiempo, pero cada transmisor codifica la señal con un código recibido previamente, solamente conocido por su par receptor. Por tanto, cada receptor decodifica de manera apropiada y no acepta señales que son en principio para otros destinatarios.

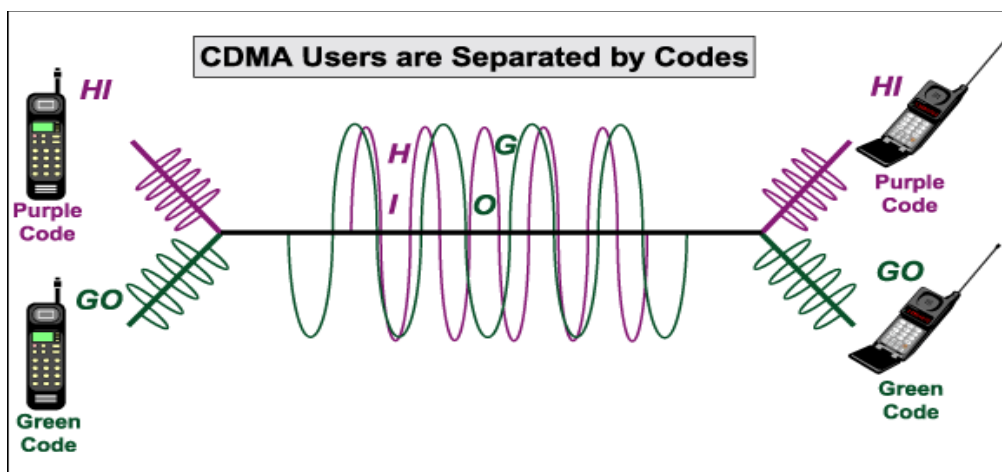


Figura 1. Esta imagen representa como funciona CDMA

FDMA (Frequency Division Multiple Access), es otro método para el tratamiento de interferencias, principalmente en radiocomunicaciones.

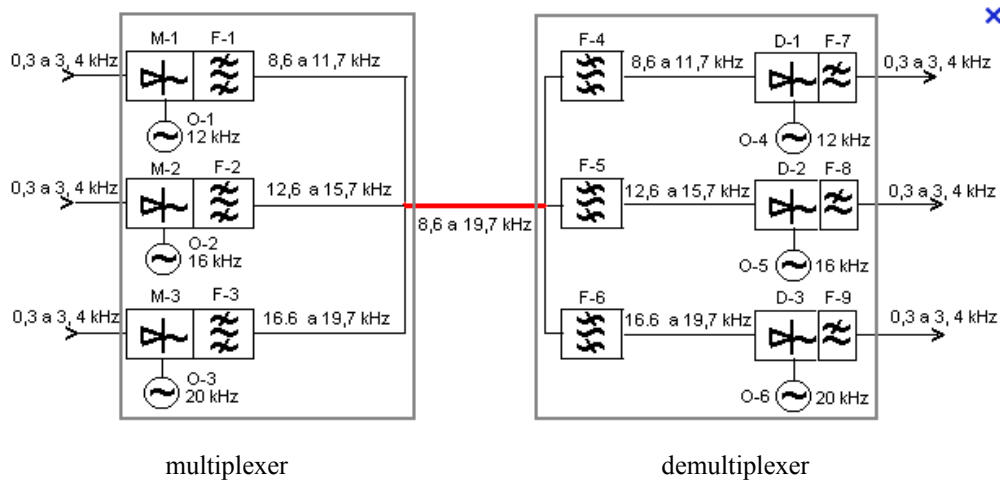


Figura 2. Este esquema representa el sistema FDMA

FDMA utiliza un par multiplexor-demultiplexor para conseguir su objetivo. En primer lugar, este cambia la frecuencia de la señal de (ancho de banda) de los diferentes canales mediante moduladores, osciladores y filtros, todos ellos localizados en el multiplexor. Una vez llevado esto a cabo, las señales se transmiten mediante el mismo medio a los receptores. Una vez las señales son recibidas, un demultiplexor colocado en el extremo receptor, hace la operación inversa, recuperando las señales originales devolviéndolas a su ancho de banda.

Otra técnica destinada al fin de abolir interferencias, es TDMA (Time Division Multiple Access) la que es hoy ampliamente utilizada.

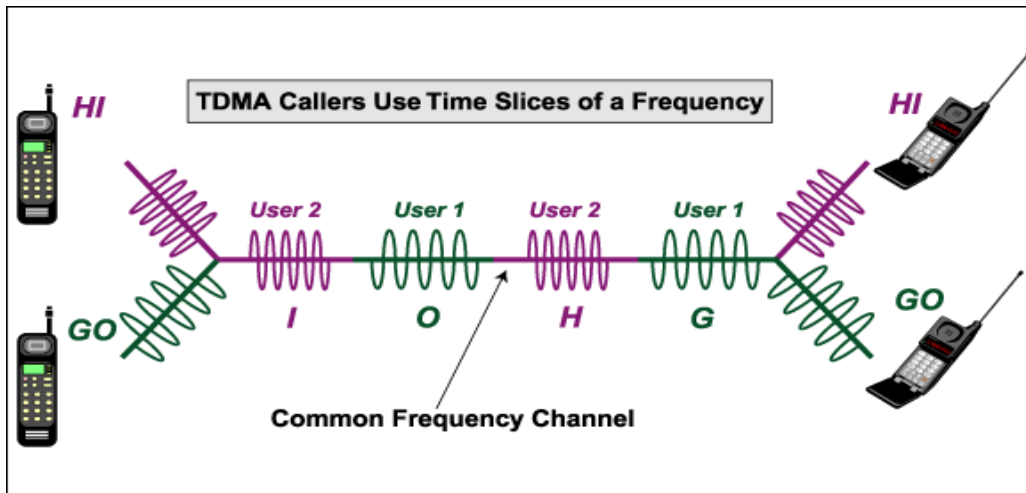


Figura 3. Esta imagen representa como trabaja TDMA

Este método necesita que los transmisores estén conectados a un multiplexor y los receptores a un demultiplexor. Estas trabajan asignando el total del ancho de banda a un canal durante un determinado tiempo, establecido por el reloj del sistema el cual está colocado tanto en el multiplexor como en el demultiplexor. Por ello, el canal puede transmitir durante el reloj del sistema lo permite mientras que el resto de canales esperan su turno.

Hay otros métodos, sólo para redes inalámbricas, que intentan minimizar los daños de las perturbaciones, por ejemplo, utilizando relés.

Los relés son interruptores eléctricos y existen muchos tipos.

En las tecnologías inalámbricas, estas pueden ofrecer distintos métodos, dependiendo de como se diseñen. Los circuitos electrónicos están integrados dentro de un sistema basado en relés, que son los que tratan la señal una vez la reciben, y después la vuelven a retransmitir.

Algunos de ellos, llamados relés AF (*Amplify and Forward*) se diseñan para amplificar la señal que reciben, funcionando como un simple amplificador. Otros llamados relés DF (*Decode and Forward*) se diseñan para decodificar la señal que reciben, tratarla, volver a codificarla y retransmitirla en última instancia.

Los dispositivos basados en relés son utilizados en muchas áreas, pero para este trabajo nos centraremos en el tipo utilizados en comunicaciones inalámbricas.

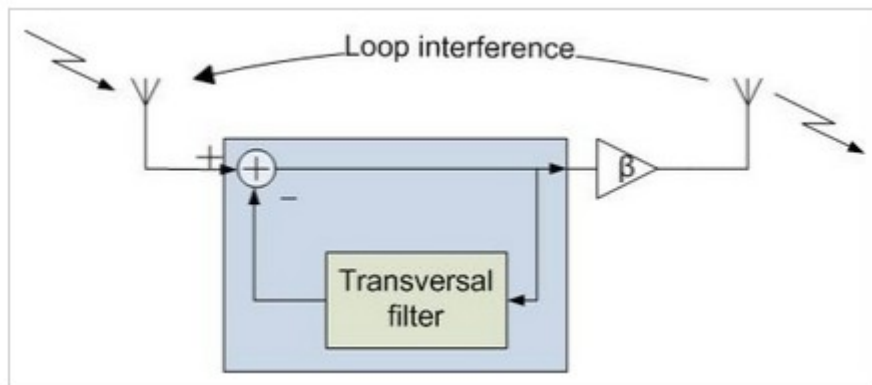


Figura 4. Ejemplo de un relé

Este tipo de relés actúan como un dispositivo intermedio entre los transmisores y los receptores. Estos reciben la señal de las fuentes y entonces, tras aplicar el tratamiento, retransmiten la señal modificada a los receptores finales.

Los métodos basados en relés., referidos a tratamiento de interferencias, ofrecen una forma distinta de controlar estas a las explicadas para los métodos TDMA, CDMA o FDMA. Estos procesos no necesitan dispositivos como multiplexores, demultiplexores o moduladores etc.. consisten en colocar unos relés entre las fuentes y los destinatarios. Reciben la señal de los transmisores, aplican una función para ajustar esta que más tarde ayudará a abolir las interferencias. Después de un determinado tiempo, las señales serán retransmitidas a los destinatarios finales.

Como hemos explicado, los relés reciben las señales y después las retransmiten. Esta operación es posible porque están equipados con antenas.

Las antenas están diseñadas para emitir y/o recibir ondas electromagnéticas. Las antenas transmisoras transforman diferencias de potencial en ondas electromagnéticas y las receptoras, viceversa. Antennas are devices designed to emit or receive electromagnetic waves.

Hay muchos tipos de antenas.

Algunas de ellas persiguen transmitir las ondas en todas las direcciones (por ejemplo, canales de televisión), otras transmiten en una sólo dirección, cuando el objetivo es que no todos los usuarios reciban estas señales.

En los relés para este propósito, encontramos pares de antenas. Una de ellas es dedicada a recibir la señal desde los transmisores, y la otra, a transmitir la señal hacia los receptores una vez la tarea ha sido completada.

Al mismo tiempo, tanto las fuentes como los destinatarios poseen antenas, para transmitir y recibir, respectivamente; de otra manera, el proceso no podría ser establecido ni finalizado. Además, tanto los primeros como los segundos poseen filtros para permitir sólo las frecuencias deseadas. Sin ellos, los receptores captarían otras frecuencias y no podrían operar de manera funcional.

Hay varios métodos para tratar las interferencias con relés en comunicaciones inalámbricas.

Uno de ellos, por ejemplo, es el conocido como *supresión de interferencias*. Este consiste en que los relés están programados para enviar una copia limpia de la señal que produce la interferencia a los nodos destinatarios. Una vez esta es recibida en los receptores, la comparan con la otra señal y pueden procesar la señal transmitida

Otra es la conocida como *neutralización de interferencias* que ha sido la última en ser descubierta. Este método trabaja neutralizando las interferencias mediante la transmisión de la misma señal con el mismo nivel de potencia, las cuales producen interferencia pero de distinto signo. Una vez ambas en el nodo receptor, la señal de interferencia se cancela.

Otra técnica es conocida como *alineamiento de interferencias (IA)*, la cual será estudiada en el resto del escrito.



## **STRUCTURE**

Este trabajo se organiza de la siguiente manera. work is organized as following .

En primer lugar, analizaremos las diferentes topologías existentes, empezando por la basada en muchos relés con una sólo antena en cada relé,; debdo a su siplicidad. Ello nos permitirá entender mejor el proceso siguiente relacionado con esta tecnología.

En el segundo capítulo, desarrollaremos este caso con más detalle y entraremos en la segunda y tercera topología: un sólo relé provisto de muchas antenas y varios relés provistos de múltiples antenas, respectivamente.

Las energías necesarias para llevar a cabo IA se estudiarán con detalle en el capítulo nº3, mientras que la capacidad de los canales se analizará en el cuarto capítulo.

En el capítulo quinto, mosraremos los diferentes resultados para cada topología de red. Para ello, hemos utilizado el software MatLab.

Finalmente, en capítulo nº6, discutiremos la conveniencia de utilizar un método u otro, con los resultados en mano.

# CAPITULO 1

## MODELO DEL SISTEMA

### *1.1 ALINEAMIENTO DE INTERFERENCIAS (IA)*

Para un canal invariante en el tiempo, IA en un escenario que consiste en múltiples pares de nodos (cada uno de ellos trata de comunicarse con su correspondiente) los cuales pueden ser llamados fuentes a los que transmiten la información y destinatarios a los que la reciben. También, entre fuentes y destinatarios, colocamos una serie de relés provistos de antenas. El número de ambos depende de una serie de parámetros.

Las fuentes comienzan la transmisión, la cual fluye a través de estos relés y finalmente, los nodos destinatarios lo reciben. Podemos dividir el proceso total en dos etapas. En la primera, las fuentes transmiten la señal y, los relés y destinatarios la reciben directamente. En la segunda etapa, después de un ajuste en la amplitud y fase de la señal, esta es retransmitida hacia los nodos destinatarios.

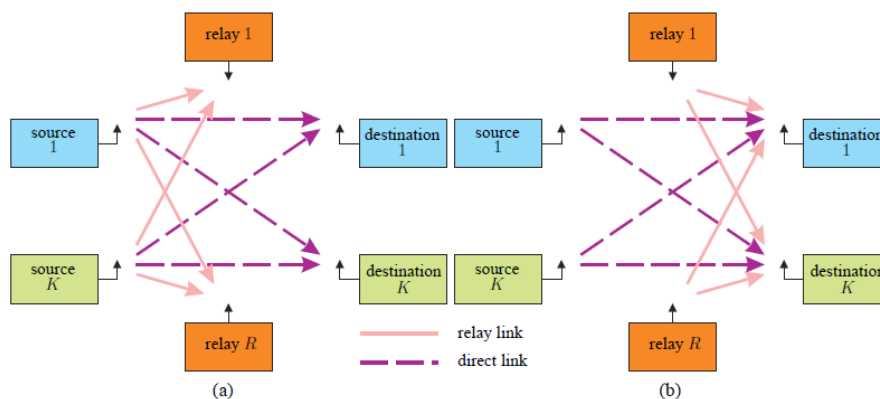


Figura 5.(a) representa la primera etapa, y la (b), la segunda.

Como se discutió en la introducción de esta tesis, establecemos el método de IA dentro de las comunicaciones inalámbricas haciendo uso de relés y antenas, que permiten tres esquemas distintos.

Apartir de ahora, utilizaremos algunos subíndices para referirnos a los diferentes coeficientes, filtros, señales y el resto de parámetros que toman parte en el proceso IA.

## ***1.2 CONCEPTOS Y PARAMETROS***

En esta sección, definiremos los términos básicos, el resto serán aclarados más tarde.

Utilizaremos el índice "n-th" para cada uno de las K fuentes, y el índice "m-th" para cada uno de los K destinatarios; y finalmente "r-th" será usado para referirnos a cada uno de los R relés.

Entre las "n-th" fuentes, los "r-th" relés y los "m-th" destinatarios, está cada canal donde las cadenas de información fluye. Estos canales quedan definidos por sus coeficientes, lo cuales abreviaremos de la siguiente manera. Usaremos " $H_{DS}^{(m,n)}$ " para definir los coeficientes del enlace fuente-destinatario, " $H_{RS}^{(r,n)}$ " para el link fuente-relé y finalmente, " $H_{DR}^{(m,r)}$ " que será el coeficiente del link relé-destinatario. Es importante dejar claro que, todos estos coeficientes serán tratados como constantes durante la transmisión completa, ya que hemos considerados canales invariantes con el tiempo.

También tendremos en cuenta la señal de ruido. Nos referiremos a ella como " $n_D$ " y " $n_R$ ", para el ruido recibido en los relés y en los destinatarios, respectivamente.

## ***1.3 MODELO DEL SISTEMA***

Consideraremos un escenario consistente de "K" pares de fuentes-destinatarios, equipados con filtros transmisores y receptores, respectivamente; y una sola antena

por cada uno de los nodos. Entre ellos colocaremos los “R” relés con una única antenas.

En el primer *stage*, la "n-th" fuente transmite una señal ( $s_1^{(n)}$ ) que se recibe en el "m-th" nodo destino como

$$e_1 = \sum_{n=1}^k h_{DS}^{(m,n)} s_1^{(n)} + n_D^{(m)} \quad (1)$$

y también en el "r-th" relé como

$$e_R = \sum_{n=1}^k h_{RS}^{(r,n)} s_1^{(n)} + n_R^{(r)} \quad (2)$$

Cada relé se define por su parámetro de ganancia. Este factor multiplica la señal recibida desde la fuente y entonces, la señal completa es traspuesta antes de retransmitirse,

$$s_R^{(r)*T} = g^{(r)*T} e_R^{(r)*T} \quad (3)$$

En la segunda etapa, los relés retransmiten esta señal al mismo tiempo que la fuentes, por lo que el resultado de esta etapa es ambas señales recibidas en el destino:

$$e_2^{(m)} = \sum_{n=1}^K h_{DS}^{(m,n)} s_2^{(n)} + \sum_{r=1}^R h_{DR}^{(m,r)} s_R^{(r)} + n_D^{(m)} \quad (4)$$

Atendiendo a ambas etapas, la señal en los nodos destino es un vector de la forma

$$\begin{pmatrix} e_1^{(m)} \\ e_2^{(m)} \end{pmatrix} = \sum_{n=1}^K H^{(m,n)} \begin{pmatrix} s_1^{(n)} \\ s_2^{(n)} \end{pmatrix} + n_D^{(m)} \quad (5)$$

Donde el ruido es

$$n_D^{(m)} = \left( \begin{array}{c} n_D^{(m)} \\ \sum_{r=1}^R h_{DR}^{(m,r)} g^{(r)} n_R^{(r)} + n_D^{(m)} \end{array} \right) \quad (6)$$

y podemos obtener los coeficientes del canal como

$$H^{(m,n)} = \left( \begin{array}{cc} h_{DS}^{(m,n)} & 0 \\ \sum_{r=1}^R h_{DR}^{(m,r)} g^{(r)} h_{RS}^{(r,n)} & h_{DS}^{(m,n)} \end{array} \right) \quad (7)$$

Es importante tener en cuenta, que esta ecuación nos muestra que cada nodo destino recibe señal de cada nodo fuente y de cada relé, sin excluir ni señal útil ni interferencias. Esto quiere decir que aun no hemos logrado IA.

También hay que remarcar la importancia de conocer las matrices de coeficientes de canal por separado, ya que más tarde las utilizaremos.

Esta es la matriz entre relés y nodos destino

$$H_{DR}^{(m,r)} = \left[ \begin{array}{cccc} h_{DR}^{(1,1)} & h_{DR}^{(1,2)} & \dots & h_{DR}^{(1,R)} \\ h_{DR}^{(2,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ h_{DR}^{(3,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ h_{DR}^{(4,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{DR}^{(K,1)} & \dots & \dots & h_{DR}^{(K,R)} \end{array} \right] \quad (8)$$

y esta es la matriz entre nodos fuente y relés

$$H_{RS}^{(r,n)} = \begin{bmatrix} h_{RS}^{(1,1)} & h_{RS}^{(1,2)} & \dots & h_{RS}^{(1,K)} \\ h_{RS}^{(2,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ h_{RS}^{(3,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ h_{RS}^{(4,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{RS}^{(R,1)} & \dots & \dots & h_{RS}^{(R,K)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

También es importante darse cuenta que, mientras que en la matriz "H<sub>DR</sub>" los relés aumentan el subíndice de forma horizontal, y los nodos destino de forma vertical; "H<sub>RS</sub>" lo hace de una manera opuesta, los relés aumentan con la vertical y los nodos fuente en horizontal.

## CAPÍTULO 2:

### IA MEDIANTE RELÉS.

#### ***2.1 DIFERENTES TOPOLOGÍAS***

Como hemos remarcdo anteriormente, necesitamos hacr “algo” parra tratar las inerferencias.

Para logra IA, es absolutamente necesaiio y a la vez suficciente, el cumplimiento de dos condiciones:

$$u_m^{*T} H^{(m,n)} v_n = 0, \rightarrow \nabla m, n \prec m \neq n \succ \quad (10)$$

y

$$u_m^{*T} H^{(m,n)} v_n \neq 0, \rightarrow \nabla m, n \prec m = n \succ \quad (11)$$

"V" y "u" son los filtros transmisores y receptores respectivamente, y serán considerados constantes en este escrito aunque podrían ser variables. Además, podemos reducir la complejidad mediante el uso de filtros adaptados, pero en este trabajo se consideraran invariantes.

La primera condición trata que cada señal recibida en el nodo destino, pero no transmitida desde el nodo fuente par, ha de ser anulada ya que será interferencia; mientras que la segunda ecuación significa que cada señal recibida en el nodo destino procedente del nodo fuente par, no puede ser anulada ya que es la señal útil. Usando otros términos, las interferencias han de ser canceladas (primera ecuación) pero no la señal útil (segunda ecuación) ya que eso sería alinear señal útil con interferencias.

## 2.2 ÚNICA ANTENA POR RELÉ

Una vez hemos entendido estas condiciones, podemos olvidarnos de la segunda ecuación por el momento para centrarnos en la primera (10).

Para un mejor entendimiento, podemos reescribirla de esta manera

$$\sum_{r=1}^R h_{DR}^{(m,r)} h_{RS}^{(r,n)} g^{(r)} = -h_{DS}^{(m,n)} \left( \frac{v_2^{(n)}}{v_1^{(n)}} + \frac{u_1^{(m)}}{u_2^{(m)}} \right) \quad (12)$$

Al inicio del capítulo anterior propusimos un escenario consistente en K pares de nodos fuente-destinatario. Trabajando en esta ecuación, podemos comprobar fácilmente que, una vez los links de señal útil están excluidos, tenemos K(K-1) ecuaciones: tenemos "K" fuentes las cuales crean interferencias en todos los nodos excepto uno, por tanto "K-1". Esto nos lleva a la conclusión de que necesitamos K(K-1) variables libres para solucionar este sistema de ecuaciones.

Los filtros transmisores y receptores son constantes, al igual que los coeficientes del canal, por tanto, como trabajamos con una sola antena por relé, únicamente podremos variar el número de relés, los cuales se definen por su parámetro ganancia

“g”. eso significa que necesitaremos  $R = K(K-1)$  relés para solucionar el sistema de ecuaciones con una sólo solución.

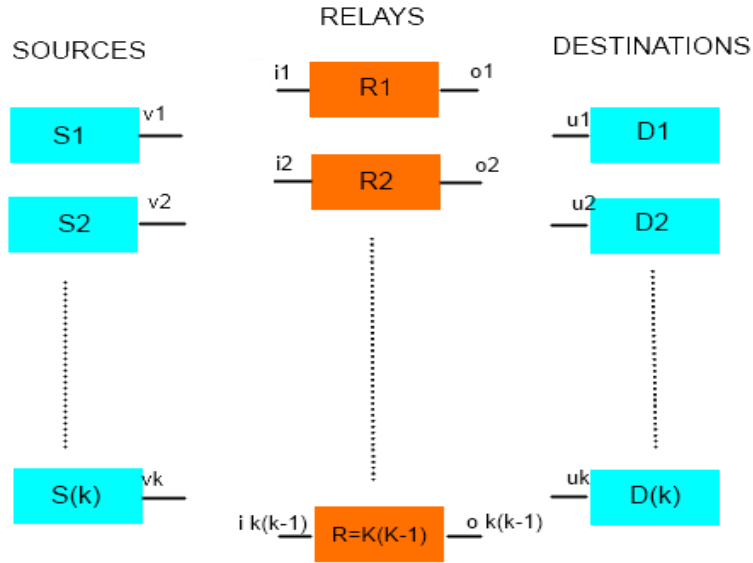


Figura 6. Esquema IA utilizando una única antena por relé

Podemos solucionarlo con múltiples soluciones, pero para ello incrementaríamos la complejidad de la red y los costes, por lo que buscamos una solución única.

Para una visión más clara, desarrollamos la 10<sup>th</sup> ecuación en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} h_{DR}^{(2,1)} h_{RS}^{(1,1)} & h_{DR}^{(2,2)} h_{RS}^{(2,1)} & \dots & h_{DR}^{(2,R)} h_{RS}^{(R,1)} \\ h_{DR}^{(3,1)} h_{RS}^{(1,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ h_{DR}^{(K,1)} h_{RS}^{(1,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ h_{DR}^{(1,1)} h_{RS}^{(1,2)} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{DR}^{(K-1,1)} h_{RS}^{(1,K)} & \dots & \dots & h_{DR}^{(K-1,R)} h_{RS}^{(R,K)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g^1 \\ g^2 \\ \vdots \\ g^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{DS}^{(2,1)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{DS}^{(K-1,K)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \end{bmatrix}$$

Esta ecuación matricial es completamente válida, pero podemos modificarla un poco usando un operador matricial conocido como “producto Kronecker” en la matriz de coeficientes de canal, y utilizando una forma vectorial en la matriz de parámetros ganancia de los relés (para este caso, no notamos ninguna diferencia en la matriz ganancia de los relés pero si lo notaremos en las otros dos topologías de red IA).



El producto Kronecker, aplicado a matrices, opera de esta manera:

$$A \otimes B = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} & a_{11}b_{12} & \cdots & a_{1n}b_{1q} \\ a_{11}b_{21} & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1}b_{p1} & \cdots & \cdots & a_{mn}b_{pq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ya se mostró en el primer capítulo, de una forma separada  $H_{DR}$  y  $H_{RS}$ , y contamos la diferencia de como se distribuyen los relés y los pares fuente-destino en ambas matrices.

Desarrollamos  $H^{(m,n)}$ , la gran matriz que queda en el lado izquierdo, multiplicando  $H_{DR}$  por  $H_{RS}$ ; pero para presentar  $H^{(m,n)}$  como producto Kronecker necesitamos trasponer  $H_{RS}$  ahora,  $H_{DR}$  será multiplicado por  $H_{RS}$ .

$$H_{RS}^{(r,n)T} = \begin{bmatrix} h_{RS}^{(1,2)} & h_{RS}^{(2,2)} & \cdots & h_{RS}^{(R,2)} \\ h_{RS}^{(1,3)} & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{RS}^{(1,K)} & \cdots & \cdots & h_{RS}^{(R,K)} \end{bmatrix} \otimes H_{DR}^{(m,r)} = \begin{bmatrix} h_{DR}^{(1,1)} & h_{DR}^{(1,2)} & \cdots & h_{DR}^{(1,R)} \\ h_{DR}^{(1,3)} & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{DR}^{(K-1,1)} & \cdots & \cdots & h_{DR}^{(K-1,R)} \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (15)$$

$$H^{(m,n)} = \begin{bmatrix} H_{RS}^{(1,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,1)} & H_{RS}^{(2,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,2)} & \cdots & H_{RS}^{(R,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,R)} \\ H_{RS}^{(1,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,1)} & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{RS}^{(1,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,1)} & \cdots & \cdots & H_{RS}^{(R,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,R)} \end{bmatrix}$$

También convertimos cada relé en la matriz “G” en un vector que contiene cada antena. Al mismo tiempo, la matriz “G” será un vector que contendrá todos estos vectores,

$$G^{(r)} = \begin{bmatrix} \text{vec}(G^{(1)}) \\ \text{vec}(G^{(2)}) \\ \vdots \\ \text{vec}(G^{(R)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g^{(1)} \\ g^{(2)} \\ \vdots \\ g^{(3)} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Como se notificó, debido a que los relés sólo poseen una antena, los vectores contienen sólo un elemento.

Mediante el producto Kronecker la ecuación matricial final, quedará de la siguiente manera:

$$\sum_r \left( \left( H_{RS}^{(r,l)T} \otimes H_{DS}^{(k,r)} \right) \text{vec}(G^{(r)}) \right) = -h_{DS}^{(k,l)} \left( v_{l,2} / v_{l,1} + u_{k,1}^* / u_{k,2}^* \right) \quad (17)$$

o en una visión desarrollada,

$$\begin{bmatrix} H_{RS}^{(1,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,1)} & \dots & \dots & H_{RS}^{(R,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,R)} \\ H_{RS}^{(1,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,1)} & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{RS}^{(1,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,1)} & \dots & \dots & H_{RS}^{(R,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,R)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{vec}(G^{(1)}) \\ \text{vec}(G^{(2)}) \\ \vdots \\ \text{vec}(G^{(R)}) \end{bmatrix} =$$

$$- \begin{bmatrix} h_{DS}^{(2,1)} \left( v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2 \right) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{DS}^{(K-1,K)} \left( v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2 \right) \end{bmatrix}$$

### 2.3 ÚNICO RELÉ EQUIPADO CON MÚLTIPLES ANTENAS.

Una vez explicado todo sobre la topología formada por relés equipados con una única antena, es tiempo para pasar al siguiente caso cuestión de estudio: un único relé equipado con múltiples antenas.

Antes de comenzar, nos gustaría explicar que, cuando hablamos del número de antenas “M”, nos referimos a antenas pares (una dedicada a la señal de entrada y la otra a la de salida).

En primer lugar, necesitamos averiguar cuantas antenas son necesarias para cumplimentar los requerimientos de IA.

En el primer caso, necesitábamos  $K(K-1)$  en un escenario con  $K$  pares de usuarios. Esto significa que necesitábamos al menos  $K(K-1)$  caminos diferentes para lograr una única solución. Ahora este concepto no cambia, necesitamos también  $K(K-1)$  para alcanzar nuestro objetivo.

Cada señal recibida en la entrada de cada relé, es transmitido por cada relé en su salida, por lo que “ $M$ ” antenas de entrada multiplicado por “ $M$ ” antenas de salida es la combinación que nuestro relé dispone ( $M^2$ ). Como necesitamos  $K(K-1)$  combinaciones,

$$M^2 \geq K(K-1)$$

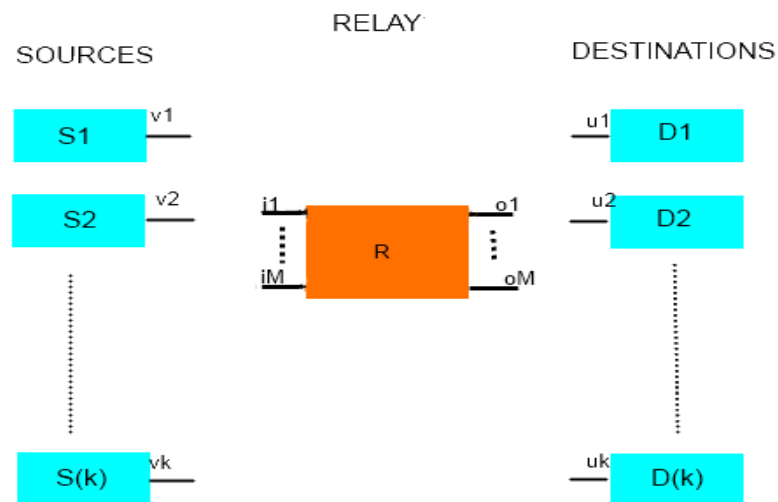


Figura 7. Estructura IA utilizando un único relé equipado con múltiples antenas.

El símbolo " $\geq$ " aparece en esta ecuación porque quizá, la solución a esta ecuación no es un número entero, por lo que habrá que aproximarla escogiendo siempre el inmediato superior.

De la misma manera que en la primera topología, necesitamos coger cualquier número mayor que solución a esta ecuación, y en caso de ser así, necesitaremos soluciones múltiples para el sistema de ecuaciones, pero necesitaríamos hacer el relé más complejo, lo cual es innecesario ya que una única solución satisficaría nuestras exigencias.

Ahora, tenemos el mismo sistema de ecuaciones que en el primer caso, pero cambiando lo concerniente a los relés

$$\sum_{m=1, n=1}^{M, M} h_{DR}^{(m,o)} h_{RS}^{(i,n)} \mathbf{g}^{(i,o)} = -h_{DS}^{(m,n)} \begin{pmatrix} v_2^{(n)} & u_1^{(m)} \\ v_1^{(n)} & u_2^{(m)} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Utilizamos los subíndices "i" y "o" que significan "input" (entrada) y "output" (salida), respectivamente. Utilizamos "i" para la matriz  $h_{RS}$  matrix porque son las antenas de entrada que reciben las señales desde los transmisores y "o" para la matriz  $h_{DR}$ , para las antenas de salida, encargadas de la retransmisión de esta.

En una forma desarrollada

$$\begin{bmatrix} h_{DR}^{(2,1)} h_{RS}^{(1,1)} & \dots & \dots & \dots & h_{DR}^{(2,M)} h_{RS}^{(1,1)} & \dots & h_{DR}^{(2,M)} h_{RS}^{(M,1)} \\ h_{DR}^{(3,1)} h_{RS}^{(1,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{DR}^{(K,1)} h_{RS}^{(1,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{DR}^{(1,1)} h_{RS}^{(1,2)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{DR}^{(K-1,1)} h_{RS}^{(1,K)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & h_{DR}^{(K-1,M)} h_{RS}^{(M,K)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{g}^{1,1} \\ \mathbf{g}^{1,2} \\ \mathbf{g}^{1,3} \\ \mathbf{g}^{M,1} \\ \vdots \\ \mathbf{g}^{M,M} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} h_{DS}^{(2,1)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{DS}^{(K-1,K)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \end{bmatrix}$$

Al igual que en la primera topología, trasponer la matriz  $h_{RS}$  y cambiar el orden de los productos en  $H^{(m,n)}$ ; podemos presentar este sistema de ecuaciones como una matriz de productos Kronecker

$$\sum_r \left( (H_{RS}^{(i,l)T} \otimes H_{DR}^{(k,o)}) \text{vec}(G^{(i,o)}) \right) = -h_{DS}^{(k,l)} (v_{l,2} / v_{l,1} + u_{k,1}^* / u_{k,2}^*) \quad (21)$$

También, lo presentamos en su forma desarrollada,

$$\begin{bmatrix} h_{RS}^{(1,1)T} \otimes h_{DR}^{(2,1)} & \dots & \dots & \dots & h_{RS}^{(1,1)T} \otimes h_{DR}^{(2,M)} & \dots & h_{RS}^{(M,1)T} \otimes h_{DR}^{(2,M)} \\ h_{RS}^{(1,1)T} \otimes h_{DR}^{(3,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{RS}^{(1,1)T} \otimes h_{DR}^{(K,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{RS}^{(1,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{RS}^{(1,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & h_{RS}^{(M,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,M)} \end{bmatrix} \text{vec}(G) = \begin{bmatrix} h_{DS}^{(2,1)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{DS}^{(K-1,K)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \end{bmatrix}$$

donde  $\text{vec}(G)$  representa cada posible camino entre entre las antenas de entrada y salida en los relés en forma vectorial

$$\text{vec}(G) = \begin{bmatrix} g^{(1,1)} \\ g^{(1,2)} \\ \vdots \\ g^{(1,M)} \\ \vdots \\ g^{(M,M)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

## ***2.4 MÚLTIPLES RELÉS EQUIPADOS CON MÚTIPLES ANTENAS.***

Finalmente, presentamos a tercera y última para llevar a cabo IA en redes inalámbricas. Consiste un una serie de relés provistos de varios pares de antenas cada uno.

Siguiendo los mismos pasos que anteriormente, vamos a averiguar el número necesario de relés y pares de antenas por relé.

Podríamos necesitar  $K(K-1)$  relés para alcanzar el número de caminos necesarios pero ahora podemos reducirlo mediante el uso de antenas, las cuales son inversamente proporcional. Ya vimos en la segunda topología que el número de caminos a través de antenas era " $M^2$ ", por lo que

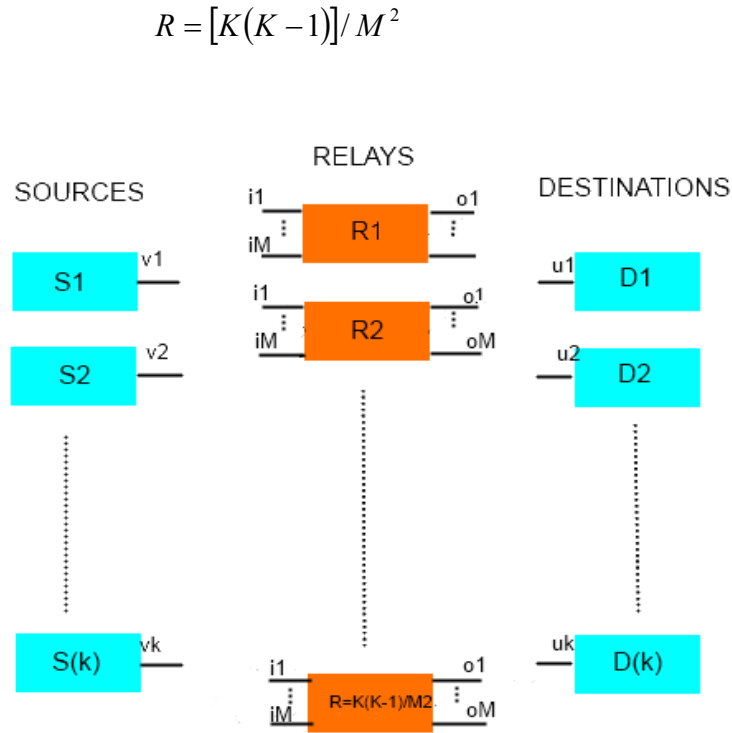


Figura 8. Topología IA mediante el uso de múltiples relés equipados con múltiples antenas

El sistema de ecuaciones para alcanzar IA, después de las modificaciones apropiadas, es

$$\sum_{r=1, m=1, n=1}^{R, M, M} h_{DR}^{(m,ro)} h_{RS}^{(ri,n)} g_{(r)}^{(i,o)} = -h_{DS}^{(m,n)} \left( \frac{v_2^{(n)}}{v_1^{(n)}} + \frac{u_1^{(m)}}{u_2^{(m)}} \right) \quad (24)$$

Añadimos "r" con sub- y superíndices "i" y "o" dado que ahora tenemos tanto relés como antenas en el campo de las variables

De una forma desarrollada,

$$\begin{bmatrix} h_{DR}^{(2,11)} h_{RS}^{(11,1)} & \dots & \dots & \dots & h_{DR}^{(2,1M)} h_{RS}^{(12,1)} & \dots & h_{DR}^{(2,RM)} h_{RS}^{(RM,1)} \\ h_{DR}^{(3,11)} h_{RS}^{(11,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{DR}^{(K,11)} h_{RS}^{(11,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{DR}^{(1,11)} h_{RS}^{(11,2)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{DR}^{(K-1,11)} h_{RS}^{(11,K)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & h_{DR}^{(K-1,RM)} h_{RS}^{(RM,K)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1^{1,1} \\ g_1^{1,2} \\ g_1^{1,3} \\ g_1^{M,1} \\ \vdots \\ g_R^{M,M} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} h_{DS}^{(2,1)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{DS}^{(K-1,K)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \end{bmatrix}$$

Como en los dos casos anteriores, podemos presentar también este sistema de ecuaciones como una expresión del producto Kronecker, trasponiendo la matriz  $h_{RS}$  y cambiando el orden de los factores para lograr el correcto  $H^{(m,n)}$

$$\sum_{r,m,m} \left( (H_{RS}^{(ri,l)T} \otimes H_{DR}^{(k,ro)}) \text{vec}(G_r^{(i,o)}) \right) = -h_{DS}^{(k,l)} (v_{l,2} / v_{l,1} + u_{k,1}^* / u_{k,2}^*) \quad (26)$$

viéndola de una forma desarrollada

$$\begin{bmatrix} h_{RS}^{(11,1)T} \otimes h_{DR}^{(2,11)} & \dots & \dots & \dots & h_{RS}^{(21,1)T} \otimes h_{DR}^{(2,21)} & \dots & h_{RS}^{(RM,1)T} \otimes h_{DR}^{(2,RM)} \\ h_{RS}^{(11,1)T} \otimes h_{DR}^{(3,11)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{RS}^{(11,1)T} \otimes h_{DR}^{(K,11)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{RS}^{(11,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,11)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{RS}^{(11,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,11)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & h_{RS}^{(RM,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,RM)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{vec}(G_1) \\ \text{vec}(G_2) \\ \text{vec}(G_3) \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{vec}(G_R) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} h_{DS}^{(2,1)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{DS}^{(K-1,K)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \end{bmatrix}$$

donde

$$\text{vec}(G) = \begin{bmatrix} g_{(1)}^{(1,1)} \\ g_{(1)}^{(1,2)} \\ \vdots \\ g_{(1)}^{(M,M)} \\ \vdots \\ g_{(R)}^{(M,M)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

## 2.5 ESQUEMA GENERAL

Este tercer esquema basado en varrios relés equipados con múltiples antenas, es también compatible para logra el primer y segundo esquema dado que permite desde un único relé o antena hasta un alto número de ambos.

Para conseguir la prrimera topología, simplemente hemos de elegir tantos relés como necesitemos, equipados cada uno con una sólo antena.

Para lograr el segundo esquema, simplemente hemos de escoger un sólo relé equipado con tantos pares de antenas como nos sea necesario.

Para finalizar, volvemos a mostrar la ecuación en su forma general,

$$\sum_{r,m,m} \left( (H_{RS}^{(ri,l)T} \otimes H_{DR}^{(k,r,o)}) \text{vec}(G_r^{(i,o)}) \right) = -h_{DS}^{(k,l)} (v_{l,2} / v_{l,1} + u_{k,1}^* / u_{k,2}^*) \quad (26)$$

desarrollado en su forma matricial,

$$\begin{bmatrix} h_{RS}^{(11,1)T} \otimes h_{DR}^{(2,11)} & \dots & \dots & \dots & \dots & h_{RS}^{(RM,1)T} \otimes h_{DR}^{(2,RM)} \\ h_{RS}^{(11,1)T} \otimes h_{DR}^{(3,11)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{RS}^{(11,1)T} \otimes h_{DR}^{(K,11)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ h_{RS}^{(11,2)T} \otimes h_{DR}^{(1,11)} & \dots & \dots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{RS}^{(11,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-11,1)} & \dots & \dots & \dots & \dots & h_{RS}^{(RM,K)T} \otimes h_{DR}^{(K-1,RM)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{vec}(G_1) \\ \text{vec}(G_2) \\ \text{vec}(G_3) \\ \vdots \\ \vdots \\ \text{vec}(G_R) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{DS}^{(2,1)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_{DS}^{(K-1,K)} (v_1^1 / v_2^1 + u_2^2 / u_1^2) \end{bmatrix}$$

donde

$$\text{vec}(G) = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{(1)}^{(1,1)} \\ \mathbf{g}_{(1)}^{(1,2)} \\ \vdots \\ \mathbf{g}_{(1)}^{(M,M)} \\ \vdots \\ \mathbf{g}_{(R)}^{(M,M)} \end{bmatrix} \quad (28)$$



## CAPÍTULO 3:

### ENERGÍA NECESARIA PARA LOGRAR IA

En este capítulo, analizaremos los requisitos de energía en los relés para llevar a cabo el alineamiento de interferencias y conseguir los  $K/2$  grados de libertad (DoF). Para ello, trabajaremos sobre el esquema general, calculado en el capítulo 2.

Es importante saber que, para esta sección nos centramos en los links interferencia y no en los útiles, ya que en esta parte estos últimos no entran en juego.

Cada relé necesita energía para llevar a acabo la recepción y transmisión de las señales.

Como explicamos en el capítulo 1,, la señal recibida en los relés procedente de las fuentes es

$$e_R = \sum_{n=1}^k h_{RS}^{(ri,n)} s_1^{(n)} + n^{(r)} \quad (2)$$

$$s_R^{(r)} = g_{(r)}^{(i,o)} e_R^{(r)} \quad (3)$$

donde,

$$s_R = g_{(r)}^{(i,o)} \sum_{n=1}^k h_{RS}^{(ri,n)} s_1^{(n)} + g_{(r)}^{(i,o)} n_R^{(r)}$$

Consecuentemente, hemos de averiguar el valor de las ganancias de los relés, para cada relé o cada combinación de antenas, dependiendo de la estructura de la red inalámbrica.

$$\sum_{r,m,m} \left( (H_{RS}^{(ri,l)T} \otimes H_{DR}^{(k,ro)}) \text{vec}(G_r^{(i,o)}) \right) = -h_{DS}^{(k,l)} (v_{l,2} / v_{l,1} + u_{k,1}^* / u_{k,2}^*) \quad (26)$$

por tanto

$$\text{vec}(G_r^{(i,o)}) = - \frac{\sum_{r,m,m} (H_{RS}^{(ri,l)T} \otimes H_{DR}^{(k,ro)})}{h_{DS}^{(k,l)} (v_{l,2} / v_{l,1} + u_{k,1}^* / u_{k,2}^*)}$$

Ya hemos calculado la ganancia por cada relé, cada pareja de antenas o ambos a la vez.

También hemos explicado en el primer capítulo que, la señal retransmitida por lo relés es la siguiente

$$s_R^{(r)*T} = g_{(r)}^{(i,o)*T} e_R^{(r)*T} \quad (4)$$

donde

$$s_R^{(r)*T} = g_{(r)}^{(i,o)*T} \sum_{n=1}^k h_{RS}^{(ri,n)*T} s_1^{(n)*T} + g_{(r)}^{(i,o)*T} n_R^{(r)*T}$$

En términos matemáticos, la señal en los relés se traspone antes de ser retransmitida para ser ajustada en fase y amplitud.

La matriz covarianza de las señales recibidas, para después ser retransmitida es la siguiente

$$C_{rr} = E[s_R s_R^{*T}] = G(H_{RS} C_{ss} H_{RS}^{*T} + C_{nn}) G^{*T} \quad (27)$$

donde  $C_{ss}$  es la matriz covarianza de la señal transmitida desde las fuentes, y  $C_{rr}$  es la matriz covarianza del ruido recibido en los relés. Mediante estos términos, podemos reescribir la fórmula como

$$C_{rr} = E[s_R s_R^{*T}] = G(H_{RS} S_1 S_1^{*T} H_{RS}^{*T} + N_R N_R^{*T}) G^{*T} \quad (30)$$

El término " $N_R N_R^{*T}$ " puede ser reescrito como " $\sigma^2 I_R$ " donde " $\sigma^2$ " es la varianza del ruido y " $I_R$ " la matriz identidad de tamaño  $R \times R$ .

$$C_{rr} = E[s_R s_R^{*T}] = G(H_{RS} S_1 S_1^{*T} H_{RS}^{*T} + \sigma^2 I_R) G^{*T} \quad (31)$$

Una vez alcanzamos la ecuación de la matriz covarianza del vector retransmitido desde los relés, podemos obtener la energía necesaria por relé

$$E_R^{(r)} = E_d \text{tr}(C_{rr}^{(r)}) = E_d \text{tr} \left( G_{(r)}^{(i,o)} \left( \sum_l h_{RS}^{(ri,l)} |v_1^{(l)}|^2 h_{RS}^{(ri,l)*T} + \sigma^2 I_R \right) G_{(r)}^{(i,o)*T} \right) \quad (32)$$

Ahora, incluimos "V" en lugar de la señal "s<sub>1</sub>", que es la forma simplificada del producto "S<sub>1</sub> x S<sub>1</sub><sup>\*T</sup>", una matriz en la que la diagonal principal tiene los superíndices n = 1, 2, 3, ..., K.

También introducimos "E<sub>d</sub>", que es la energía total transmitida desde los transmisores, con otras palabras, es la relación señal-ruido.

$$E_d = SNR$$

Reescribimos la ecuación por última vez, donde podemos apreciar mejor que términos corresponden a qué parámetros retransmitidos,

$$E_R^{(r)} = E_d \text{tr} \left( \left( \sum_l G_{(r)}^{(i,o)} h_{RS}^{(ri,l)} |v_1^{(l)}|^2 h_{RS}^{(ri,l)*T} G_{(r)}^{(i,o)*T} \right) \right) + \text{tr} \left( G_{(r)}^{(i,o)} G_{(r)}^{(i,o)*T} \right) \quad (33)$$

dónde

$$\text{tr} \left( G_{(r)}^{(i,o)} G_{(r)}^{(i,o)*T} \right)$$

es la mínima potencia de ruido retransmitida " $\sigma^2$ " es siempre igual a 1, y como ya sabemos, la matriz identidad "I<sub>R</sub>" multiplicada por la matriz "X" es exactamente la matriz "X".

El primer término corresponde a la energía "útil" (es decir, la dedicada a la señal útil) y la segunda a la empleada en la retransmisión del ruido.

Finalmente, calculamos el total de energía en los relés, sumando la energía por cada relé

$$E_{Rtot} = \sum_{r,m,m} E_{(r)}^{(i,o)} \quad (34)$$

Una vez hemos calculado la energía total necesaria para transmitir la señal en los relés, con dirección a los destinatarios, convertimos este valor a decibelios.

La energía que implica a los relés es

$$10 \times \log_{10}(E_{Rtot}) \quad (35)$$

y la energía total, referida tanto a los transmisores como a los relés,

$$10 \times \log_{10}(E_{Rtot} + SNR) \quad (36)$$

## CAPÍTULO 4:

### RENDIMIENTO TOTAL DEL SISTEMA.

#### ***4.1 TEOREMA DE SHANNON-HARTLEY***

En esta sección explicaremos todo lo concerniente al rendimiento general del sistema, por ejemplo, que expresiones matemáticas y conceptos son utilizados para describir el rendimiento del sistema en comunicaciones inalámbricas; por qué son estas importantes y como usarlas para conseguir un buen resultado.

Al final de 1920's, Ralph Hartley y Harry Nyquist desarrollaron algunos fundamentos en relación a la transmisión de información la cual podría ser aplicada a la teoría del telégrafo, utilizando este como un sistema de telecomunicaciones. Todas estas ideas establecieron un gran avance en las telecomunicaciones, pero no formaron una teoría completa al respecto y debía ser mejorada.

No demasiado años después, en la década de los 40's, Claude Shannon desarrolló la envoltura del concepto de capacidad de canal de comunicaciones. Se basó en algunos parámetros que Hartley y Nyquist habían propuesto dos décadas antes, y reescritos todos ellos, lograron una teoría completa sobre la información y la transmisión a través de canales de comunicación.

El teorema de The Shannon-Hartley establece que la capacidad de un canal de comunicaciones puede ser escrito como

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N) \quad (37)$$

donde "C" es la capacidad del canal, "B" es el ancho de banda y la señal-ruido, "S/N".

Esta fórmula matemática mide la cantidad de información que puede ser transmitida por el canal. Ella se expresa en términos de tasa y tiene bits por segundo (bps) como unidad de medida.

## 4.2 TASA TOTAL

Al inicio del capítulo 2, mencionamos las dos principales leyes del IA, pero sugerimos el “olvidar” momentaneamente la ley sobre los links de información útil, porque e aquellos momentos tan sólo necesitábamos la relación entre los links de interferencias (8)

Ahora, necesitamos recuperar esta ley de nuevo, porque los links de información útil son los que establecen la efectividad del canal (9).

El teorema de The Shannon-Hartley se estableció como una fórmula maemática, para medir la capacidad de un canal en una red de comunicaciones, en general.

A continuación, desarrollaremos esta ley aplicada a la técnica IA, usando la ecuación principal, y logrando una norma específica que nos permite calcular la tasa de bit en nuestro canal de comunicaciones.

$$C = B \bullet \log_2(1 + S / N) \quad \Rightarrow \quad C = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^K \log_2(1 + \gamma_m) \quad (38)$$

donde

$$\gamma_m = \frac{E_d}{\sigma^2} \frac{\left| \mathbf{u}_m^{*T} \mathbf{H}^{(m,n)} \mathbf{v}_n \right|^2}{\left| \mathbf{u}_1^{(m)} \right|^2 + \left| \mathbf{u}_2^{(m)} \right|^2 \left( \sum_{r,m,m} \left| h_{DR}^{(m,ro)} \right|^2 \left| \mathbf{g}_{(r)}^{(i,o)} \right|^2 + 1 \right)} \quad \forall m = n \quad (39)$$

Identificando los miembros de la ecuación, podemos comprobar que “B”, el ancho de banda del canal, es igual a  $\frac{1}{2}$ , lo cual demuestra que ciertamente, el DoF de esta técnica, consigue la mitad del ancho de banda de un hipoético canal sin interferencias. También podemos identificar "  $\gamma_m$  " como la relación señal-ruido, cuyo numerador se compone de la señal útil total recibida en los nodos destino; y el denominador que contiene el ruido en estos mismos nodos. Este ruido total es como resultado del ruido almacenado en los relés debido a la primera etapa de la

comunicación y después, cuando la señal es retransmitida, el ruido debido a los transmisores en la primera etapa.

La capacidad del canal se incrementa cuando la SNR también se incrementa. Esto significa que, podemos alcanzar tanta capacidad de transmisión como señal útil recibimos, que es exactamente lo que trata de conseguir el método de IA.

Trabajando en la SNR, primero, llegamos a la señal útil (numerador). Para ello, necesitamos aplicar  $H^{(m,n)}$  al esquema general

$$H^{(m,n)} = \begin{pmatrix} h_{DS}^{(m,n)} & 0 \\ \sum_{r=1}^R h_{DR}^{(m,ro)} \mathcal{G}_{(r)}^{(i,o)} h_{RS}^{(ri,n)} & h_{DS}^{(m,n)} \end{pmatrix} \quad \forall m = n \quad (7)$$

y entonces, añadimos los filtros transmisores y receptores.

Ahora, deducimos la señal ruido en los nodos destino para completar la ecuación.

$$Z_K = E\{n_D^{(k)} n_D^{(k)*T}\} = \begin{pmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sum_{r,m,m} H_{DR}^{(k,r)} G_{(r)}^{(i,o)} G_{(r)}^{(i,o)*T} H_{DR}^{(k,r)*T} + \sigma^2 \end{pmatrix} \quad (40)$$

Fijándonos que la varianza del ruido es igual a 1

$$Z_K = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sum_{r,m,m} H_{DR}^{(k,r)} G_{(r)}^{(i,o)} G_{(r)}^{(i,o)*T} H_{DR}^{(k,r)*T} + 1 \end{pmatrix}$$

y entonces, los filtros son añadidos.

También, multiplicando por la SNR transmitida desde los nodos fuente es necesario alcanzar la relación señal-ruido total.

$$E_d / \sigma^2$$

de esta manera, la SNR total en los nodos destino se puede leer como

$$\gamma_k = \frac{E_d}{\sigma^2} \frac{\left| \mathbf{u}_k^{*T} H^{(k,k)} \mathbf{v}_k \right|^2}{\mathbf{u}_k^{*T} \mathbf{z}_k \mathbf{u}_k} \quad \nabla m = n$$

o en la forma desarrollada (39).



## CAPÍTULO 5:

### SIMULACIONES

Todas estas simulaciones se han realizado mediante el software MatLab, calculando una media de cien simulaciones por escenario, dado que hay pequeñas variaciones en los resultados como consecuencia de algunos valores aleatorios.

Esta imagen corresponde a una simulación de un escenario compuesto por tres pares fuente-destinatario, usando seis relés y una única antena por cada uno de ellos (línea roja), dos relés equipados con dos pares de antenas cada uno (línea azul) y finalmente un único relé equipado con tres pares de antenas (línea verde)

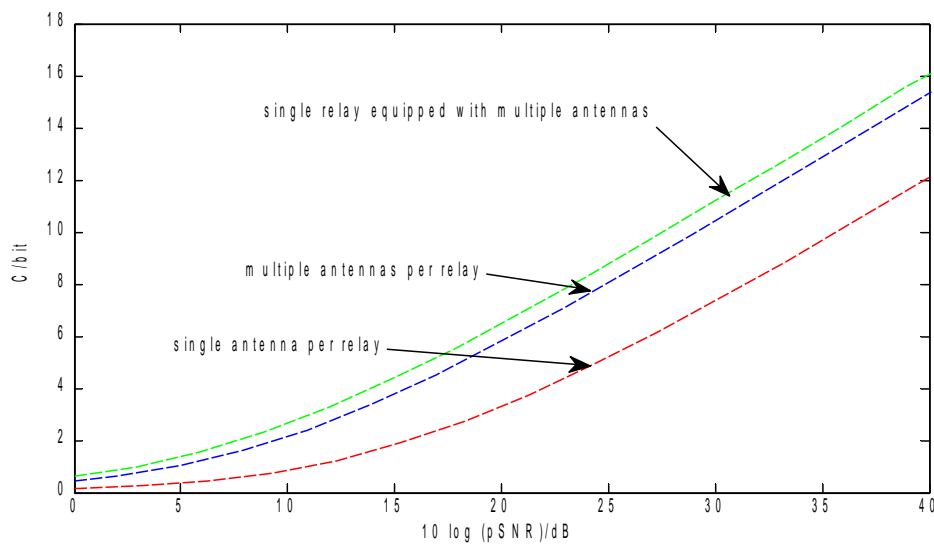


Figure 9

Como podemos ver, el mejor resultado es el obtenido usando un único relé equipado con tres pares de antenas (línea verde) ya que consigue una capacidad de canal más alta para diferentes valores de SNR, en comparación con las otras dos topologías.

Fíjense que el esquema compuesto de dos relés con dos pares de antena por relé (línea azul) muestra un rendimiento similar que la tercera topología (línea verde) pero este último es algo superior en términos de rendimiento.

Esta imagen se corresponde con la simulación de un escenario compuesto por la topología 1, cinco pares transmisor-receptor y una veintena de relés entre ellos (línea roja); topología 2, tres relés con tres pares de antenas cada uno (línea azul) y la topología 3 (línea verde) con un único relé equipado con cinco pares de antenas.

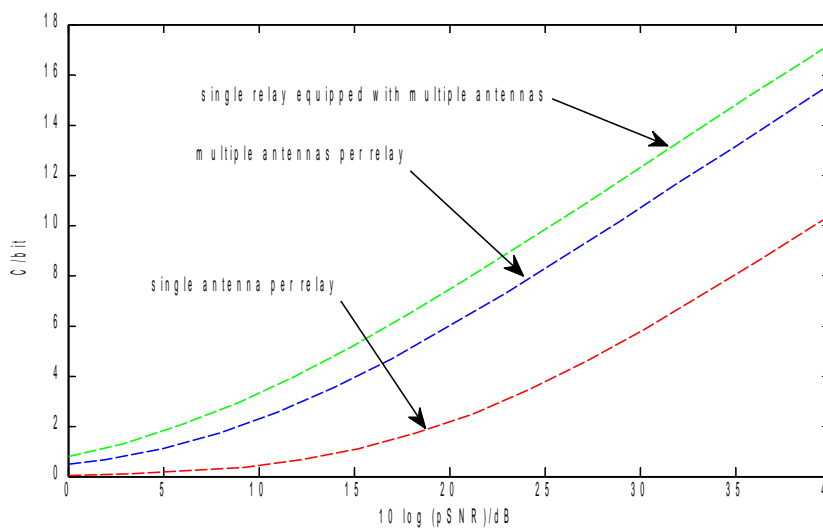


Figure 10

Una vez más, el mejor resultado es el obtenido usando la topología 3; siendo mucho mejor opción que la topología 1 y algo superior que la topología 2.

El rendimiento entre ambos mejores resultados se ha incrementado, y también, en el primer escenario, mantiene la diferencia durante todo el intervalo.

En la tercera simulación, el escenario consiste en siete pares de nodos fuente-destino, utilizando cuarenta y dos relés con una única antena por relé (línea roja); cinco relés equipados con tres pares de antenas cada uno (línea azul) y un relé equipado con siete pares de antenas (línea verde).

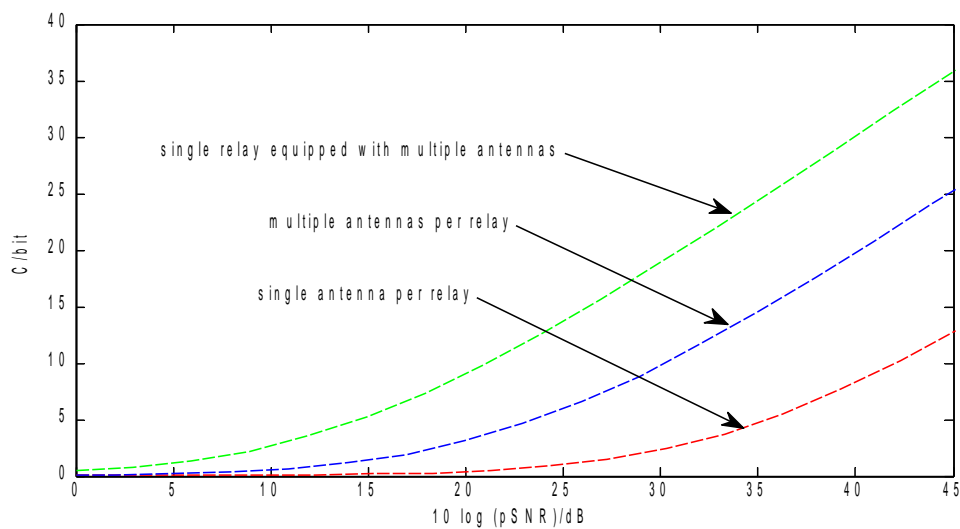


Figure 11

Los resultados vuelven a ser claros y vemos como la diferencia se va incrementando a medida que los pares de usuarios aumentan. La topología representada por la línea verde (un relé, varias antenas) aumenta considerablemente la diferencia de capacidad de transmisión en comparación con las otras dos topologías.

También es importante remarcar como mientras esta topología muestra un rendimiento superior en términos de capacidad, no solo al ser comparada a los otros dos esquemas, sino también en comparación consigo mismo en las anteriores simulaciones; las topologías 1 y 2 muestran una capacidad inferior en comparación consigo mismas en escenarios con menos pares de nodos transmisor-receptor.

## **CAPÍTULO 6:**

### **CONCLUSIONES**

En el último capítulo, hemos visto los resultados obtenidos para las distintas simulaciones, en diferentes escenarios. De acuerdo a ellas, discutiremos que topología muestra una mayor capacidad respecto a las otras dos.

Atendiendo a las tres gráficas, el mejor resultado para IA se consigue mediante el uso de un sólo relé provisto de varias antenas.

Para los tres casos, esta topología muestra una mayor capacidad del canal de transmisión sobre las otras dos topologías; siendo la consistente de varios relés equipados de varias antenas la segunda opción en rendimiento; y por último, la consistente en varios relés equipados con una sola antena.

Según se incrementan los usuarios la diferencia entre las diferentes topologías se incrementa, mostrando de nuevo que las antenas son las causantes de obtener una mayor capacidad de transmisión.

El segundo mejor esquema, que incrementa o decremente el rendimiento depende del número de antenas o relés que utilice, obteniendo mejores resultados a mayor número de antenas y menor de relés.

Muchos relés equipados con una única antena muestran el rendimiento más pobre en cuanto a capacidad del canal de comunicaciones se refiere, por lo explicado en las líneas más arriba.

Brevemente, la principal conclusión que se ha de extraer es que utilizando la técnica del alineamiento de interferencias, basada en relés y antenas; la topología más adecuada dentro de las existentes, es la compuesta por un sólo relé provisto de varias antenas, colocados estos relés entre los pares transmisor-destino.

## Bibliografía

-Interference Alignment Aided by Non-Regenerative Relays for Multiuser Wireless Networks (Hussein Al-Shatri and Tobias Weber)

- Transmission techniques for relay-interference networks (Soheil Mohajer, Suhas N. Diggavi, Christina Fragouli and David Tse)

-Wireless Signal Processing Research Group. Relays in wireless communication systems

-Interactive Messaging Unlimited. Mobile phone standards

-Wikipedia