



Casa abierta al tiempo

---

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

---

**Handoff vertical basado en  
procesos analíticos jerárquicos**

*Idónea comunicación de resultados que presenta*

**Carlos Ramírez Pérez**

*Para obtener el grado de*

**Maestro en Ciencias  
y Tecnologías de la Información**

Asesor:

**Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos**

Defendida públicamente en la UAM-Iztapalapa en septiembre de 2011  
frente al jurado calificador integrado por:

Presidente: Dr. Enrique Stevens Navarro, Facultad de Ciencias, UASLP  
Secretario: Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, Redes y Telecomunicaciones, UAM-I  
Vocal: Dr. Miguel López Guerrero, Redes y Telecomunicaciones, UAM-I

# Resumen

---

En las redes de siguiente generación, es fundamental lograr una experiencia inmejorable de conectividad permanente para los usuarios. Por esta razón, integrar las tecnologías de red actuales para ofrecer servicios colectivamente y con altos estándares de calidad representa una necesidad.

El *handoff vertical* constituye una de las principales propuestas para la integración de tecnologías inalámbricas como WiFi y WiMAX, entre otras. Este proceso consiste en redirigir el tráfico de las aplicaciones activas en un dispositivo terminal, alternando puntos de acceso para mantener o mejorar la calidad en el servicio.

La *iniciación, decisión y ejecución*, como etapas básicas del *handoff vertical*, deben resolver en *qué momento, a qué red y cómo redireccionar* el tráfico respectivamente. El objeto de investigación de este trabajo es la etapa de decisión. La interpretación de información, estática o dinámica, acerca de los gustos y preferencias de los usuarios, de los requerimientos de las aplicaciones y de las características de las redes, son aspectos esenciales para el proceso de selección.

La toma de decisión con múltiples atributos representa uno de los principales enfoques utilizados en el *handoff vertical*. Bajo este enfoque, los procesos analíticos jerárquicos (*analytic hierarchy process*- AHP), permiten establecer estructuras arbóreas para representar a los elementos involucrados en las decisiones. Las relaciones existentes entre dichos elementos son asociadas con índices numéricos denominados prioridades o pesos, que expresan cuantitativamente el grado de importancia que tienen unos elementos de decisión con respecto a otros.

En este trabajo se evalúan y comparan, utilizando como técnica de análisis la simulación, dos algoritmos de decisión basados en procesos analíticos jerárquicos.

En el primer algoritmo se define subjetivamente la relación entre las aplicaciones y los parámetros retardo, variabilidad del retardo, tasa de errores por paquete y tasa de envío. Las relaciones subjetivas determinan cuales de los parámetros anteriores tienen mayor impacto o prioridad para las aplicaciones activas en un dispositivo móvil.

El segundo algoritmo, o bien nuestra propuesta, aprovecha las principales características del primer algoritmo. Sin embargo, se propone la inclusión de los requerimientos mínimos de calidad de servicio de cada aplicación activa. Estos requerimientos pueden ser definidos y ajustados para optimizar el proceso de selección.

Los resultados obtenidos de la evaluación muestran que al incluir los requerimientos de calidad de servicio se optimiza el compromiso entre los parámetros seleccionados y los requerimientos de las aplicaciones activas. Debido a que los requerimientos pueden variar según las aplicaciones y los entornos de red, nuestro algoritmo propuesto es mas adaptable.

En la parte final de esta idónea comunicación de resultados discutimos algunos aspectos de investigación abiertos.

---

# Contenido

---

<b>Contenido</b>	<b>III</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>V</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>VII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Acceso múltiple en redes inalámbricas heterogéneas . . . . .	1
1.2. El paradigma ABC: siempre la mejor conexión . . . . .	2
1.3. Clases de servicio (CoS) y sus requerimientos de calidad (QoS) . . . . .	2
1.4. <i>Handoff</i> vertical en la coexistencia de redes inalámbricas . . . . .	4
1.4.1. El proceso de <i>handoff</i> vertical . . . . .	5
1.4.2. Gestión del <i>handoff</i> vertical . . . . .	5
1.4.3. Motivación para la decisión en el <i>handoff</i> vertical . . . . .	6
1.5. Estándar IEEE 802.21 . . . . .	7
1.5.1. Modelo de referencia IEEE 802.21 . . . . .	7
1.5.2. Continuidad y transparencia en los servicios . . . . .	8
1.5.3. Funciones para el soporte del <i>handoff</i> . . . . .	9
1.5.4. Puntos de acceso a los servicios MIH . . . . .	9
1.6. Motivación, contribución y estructura del trabajo . . . . .	10
1.6.1. Contribución . . . . .	11
1.6.2. Estructura del trabajo . . . . .	11
<b>2. Fase de decisión en el <i>handoff</i> vertical: <i>estado del arte</i></b>	<b>13</b>
2.1. Enfoque basado en funciones de costo-utilidad . . . . .	13
2.2. Enfoque basado en calidad de servicio . . . . .	14
2.3. Enfoque basado en múltiples atributos . . . . .	15
2.4. Enfoque basado en lógica difusa . . . . .	18
2.5. Comparación cualitativa de los enfoques de decisión . . . . .	19

<b>3. Acuerdo en el proceso de selección basado en AHP</b>	<b>21</b>
3.1. Aplicación del método AHP en el <i>handoff</i> vertical . . . . .	21
3.1.1. Estructura jerárquica de los elementos de decisión . . . . .	21
3.1.2. Prioridades entre los elementos de la jerarquía . . . . .	22
3.1.3. Síntesis de prioridades locales y globales . . . . .	27
3.1.4. Acuerdo entre aplicaciones . . . . .	29
<b>4. Requerimientos de QoS en el método AHP</b>	<b>33</b>
4.1. Estructura jerárquica de decisión . . . . .	33
4.2. Requerimientos mínimos en el método AHP . . . . .	34
4.2.1. Síntesis de prioridades . . . . .	35
<b>5. Evaluación de desempeño: comparación de algoritmos</b>	<b>37</b>
5.1. Metodología de simulación . . . . .	37
5.1.1. Escenario de simulación . . . . .	37
5.1.2. Caracterización de los datos de entrada . . . . .	39
5.2. Análisis y comparación de resultados . . . . .	42
5.2.1. Valores promedio y su clasificación . . . . .	42
5.2.2. Correlación entre los parámetros . . . . .	46
5.2.3. Comportamiento estadístico de los resultados de selección . . . . .	49
5.2.4. Latencia en el proceso de selección . . . . .	52
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>53</b>
<b>Referencias</b>	<b>55</b>

---

# Lista de figuras

---

1.1.	Tecnologías actuales de acceso inalámbrico en torno a Internet . . . . .	1
1.2.	Escenario de red para la aplicación del mecanismo de decisión . . . . .	4
1.3.	Aspectos principales en la gestión del <i>handoff</i> vertical . . . . .	6
1.4.	Modelo de referencia del estándar IEEE 802.21 . . . . .	8
1.5.	Flujo de información entre los servicios de <i>información, comandos y eventos</i> . . . . .	10
2.1.	Taxonomía general de los métodos MADM . . . . .	15
2.2.	Estructura general del árbol de decisión del método AHP . . . . .	18
3.1.	Estructura jerárquica de los elementos de decisión para el método de <i>handoff</i> propuesto en [21] . . . . .	22
3.2.	Comparación de los elementos de decisión en los niveles de la jerarquía . . . . .	26
3.3.	Comparación de los elementos de decisión en los niveles de la jerarquía . . . . .	29
3.4.	Histogramas de los vectores de prioridad para los perfiles de selección . . . . .	32
4.1.	Árbol de decisión propuesto para el <i>handoff</i> vertical . . . . .	34
4.2.	Enfoques para el establecimiento de relaciones entre clases de servicio . . . . .	36
5.1.	Escenario de simulación para la evaluación de los algoritmos . . . . .	38
5.2.	Distribuciones marginales de los parámetros de entrada para la evaluación de los algoritmos . . . . .	40
5.3.	Variaciones de los parámetros de las redes alternativas durante el tiempo de simulación . . . . .	41
5.4.	Parámetros promedio seleccionados vs posición en el ranking . . . . .	43
5.5.	Parámetros promedio de las tres mejores redes seleccionadas al incrementar la cantidad de alternativas . . . . .	44
5.6.	Consistencia en la clasificación de parámetros al aumentar las redes alternativas . . . . .	45
5.7.	Coefficiente de correlación entre pares de parámetros y su clasificación . . . . .	46
5.8.	Intervalos de confianza para la correlación entre los parámetros . . . . .	47
5.9.	Factores de importancia entre los parámetros promedio seleccionados . . . . .	48
5.10.	Distribuciones de los parámetros seleccionados. . . . .	49
5.11.	Histogramas de los valores seleccionados para cada parámetro . . . . .	51
5.12.	Latencia promedio de decisión al aumentar la cantidad de redes alternativas . . . . .	52



# Lista de tablas

---

1.1.	Especificación de los requerimientos mínimos de QoS de las CoS . . . . .	3
2.1.	Comparación de las características cualitativas de algunas estrategias de decisión para el <i>handoff</i> vertical . . . . .	19
3.1.	Escala de ponderación comúnmente utilizada en el método AHP . . . . .	23
3.2.	Comparaciones de los criterios en términos de la clase de servicio conversacional . . . . .	23
3.3.	Relaciones de importancia entre los criterios para cada clase de servicio . . . . .	24
3.4.	Normalización de un conjunto de medidas asociadas a un criterio considerado costo . . . . .	25
3.5.	Normalización de las medidas de un criterio considerado costo y beneficio . . . . .	26
3.6.	Vectores de medidas correspondientes a dos redes alternativas . . . . .	27
3.7.	Vectores de peso de los criterios respecto a las clases de servicio . . . . .	28
3.8.	Matrices de comparación para las aplicaciones de voz y video . . . . .	30
3.9.	Intervalos de comparación para las aplicaciones de voz y video . . . . .	30
3.10.	Matriz de comparación conjunta para las aplicaciones de voz y video . . . . .	31
3.11.	Vectores pesos relativos para las clases de servicio . . . . .	31
5.1.	Características generales de las tecnologías inalámbricas consideradas en la simulación . . . . .	38
5.2.	Vectores de pesos relativos utilizados en la evaluación de los algoritmos . . . . .	39
5.3.	Rango de valores utilizados para cada parámetro . . . . .	40

## 1.1. Acceso múltiple en redes inalámbricas heterogéneas

Actualmente, los entornos de comunicación inalámbrica son complejos debido al exitoso despliegue de diferentes tecnologías. WiFi, WiMAX y LTE entre otros, operan de manera independiente brindando soporte a diferentes aplicaciones dentro y fuera de Internet como se muestra en la Figura 1.1.

La evolución en paralelo de estas tecnologías y la habilitación de dispositivos móviles con múltiples interfaces de acceso, han dado lugar a un escenario en donde los usuarios deben monitorear y elegir manualmente una de las redes disponibles. La selección de la red se basa en información rudimentaria como la potencia o calidad de la señal [5]. Aunado a esto, las aplicaciones en red actuales han fomentado una comunidad de usuarios demandante de servicios dinámicos, altamente disponibles y adaptables a sus preferencias.

La conjunción de los aspectos anteriores ha generado una expectativa generalizada en los usuarios de encontrarse inmersos en un entorno de red global que les proporcione una conexión permanente. Todo esto puede apuntar al desarrollo de un entorno de red más heterogéneo que el actual o bien, a la convergencia de las tecnologías en una sola.

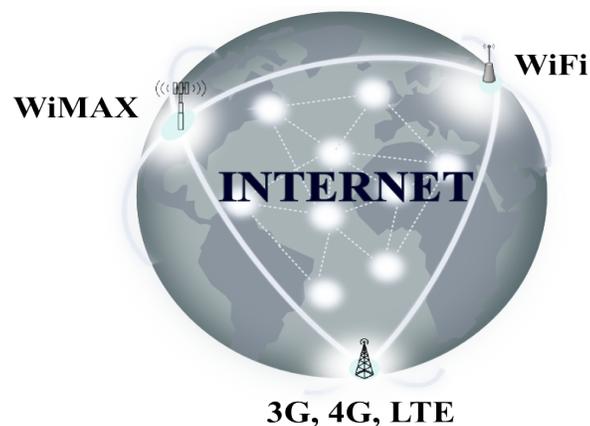


Figura 1.1: Tecnologías actuales de acceso inalámbrico en torno a Internet

## 1.2. El paradigma ABC: siempre la mejor conexión

Hoy en día resulta muy común encontrarse en un área donde la cobertura de varias redes inalámbricas se traslapa. Por lo que, seleccionar la tecnología de acceso inalámbrico que brinde la mejor conexión, es una posibilidad latente. La definición de la *mejor conexión* depende de aspectos como preferencias personales, capacidades de los dispositivos, requerimientos de las aplicaciones, seguridad y privacidad, políticas de los operadores, recursos disponibles de las redes, entre otros.

El paradigma de *siempre la mejor conexión* o bien ABC (*always best connected*), implica optimizar el desempeño de aplicaciones y brindar *movilidad transparente* a los usuarios [2]. Es decir, durante la conmutación entre redes, el usuario no debería percibir un deterioro en la calidad y continuidad de las aplicaciones. En su forma más simple, los servicios ABC proporcionan a los usuarios el acceso a diferentes servicios sobre diferentes tecnologías.

ABC contempla todas las tecnologías de acceso existentes, fijas y móviles, cableadas e inalámbricas, para proporcionar a los usuarios una experiencia de conectividad permanente de alto rendimiento. Un escenario ABC conlleva una gran complejidad y numerosos requerimientos, no sólo para la solución técnica, sino también en términos de relaciones de negocios entre operadores y proveedores de servicios.

Uno de los aspectos más importantes en el paradigma ABC es la experiencia del usuario. ¿Qué percibe el usuario que obtiene de un servicio ABC? y ¿Cómo se debe brindar el servicio ABC al usuario?, son cuestionamientos centrales que deben ser atendidos bajo este modelo de servicio.

## 1.3. Clases de servicio (CoS) y sus requerimientos de calidad (QoS)

La necesidad de comunicación de los usuarios debería ser atendida satisfaciendo además sus preferencias. Identificar patrones de uso en correspondencia con los requerimientos de calidad de servicio de las aplicaciones, puede optimizar la asignación de los recursos disponibles.

La proliferación de aplicaciones en red, como las basadas en IP por ejemplo, han generado un rápido incremento en la cantidad y diversidad del tráfico a través de diferentes redes. Una importante cantidad de este tráfico es transportado dentro y fuera de Internet, en donde el uso habitual de servicios como correo electrónico, mensajería instantánea, voz sobre IP (VoIP), streaming de audio y video, se acentúa día con día.

Cada clase de servicio (CoS- *class of service*), difiere en sus requerimientos de calidad de servicio (QoS - *quality of service*) [26]. La clasificación de los servicios responde a aspectos característicos como patrones de tráfico, cantidad de información, simetría, etc. Por otro lado, los requerimientos de QoS describen los límites característicos de parámetros como ancho de banda, retardo, variabilidad del retardo (*jitter*) y tasa de pérdidas de paquetes (PER - *Packet Error Rate*).

---

Estos parámetros tienen un efecto directo en el desempeño de las distintas CoS, que pueden ser agrupadas de la siguiente manera [1, 13]:

**Streaming:** Los usuarios o clientes pueden solicitar en cualquier momento conjuntos de datos o bien archivos almacenados en un servidor. Los usuarios se comportan como receptores mientras se transmite la información, es decir, el flujo de datos es unidireccional. El archivo no necesita descargarse completo para iniciar su reproducción.

**Conversacional:** Las aplicaciones de este tipo requieren que las variaciones temporales entre entidades de información de un flujo sean minimizadas. Parámetros como el retardo y la variabilidad del retardo, además de las pérdidas juegan un papel fundamental en este tipo de aplicaciones. En esta clase de servicio, los usuarios emisores y receptores intercambian ráfagas de datos.

**Interactivo:** El tráfico de datos transaccionales o interactivos debe garantizar un ancho de banda adecuado para las operaciones sostenidas en primer plano. Esta clase de servicio es una combinación de dos tipos similares de aplicaciones: de transferencia de datos e interactivas de mensajería. Por simplicidad, esta clase también se conoce como transaccional de datos. El tiempo de respuesta requerido establece la principal diferencia entre esta clase de servicio y las aplicaciones cliente-servidor genéricas, como e-mail. Algunos ejemplos de aplicaciones interactivas son SAP, PeopleSoft y Oracle [28].

En la Tabla 1.1, se muestran los valores mínimos de los parámetros asociados a cada CoS [27]. Estos valores sólo son válidos en escenarios donde se cuenta con un adecuado control de *eco*. Además, los valores exactos dependen de *codecs* específicos y de los algoritmos para contrarrestar la pérdida de paquetes. Todo esto en un esquema basado en IP.

Tabla 1.1: Especificación de los requerimientos mínimos de QoS de las CoS

Parámetro	Conversacional			Interactivo		Streaming		
	Audio	Video	Datos	Audio	Datos	Audio	Video	Datos
Tasas de envío	4-64 kbps	16-384kbps	<28.8kbps	4-32kbps	~10Kb	5-128kbps	16-384kbps	10KB-10MB
Pérdida de paquetes	<3 %	<1 %	<<1 %	<3 %	0	<1 %	<1 %	0
Retardo	<150ms	<150ms	<250ms	<2s	<4s	<10s	<10s	<10s
Variación del retardo	<1ms	<10ms	N.A	<1ms	N.A	<1ms	<1ms	N.A

Abreviaturas. N.A.: no aplica

## 1.4. *Handoff* vertical en la coexistencia de redes inalámbricas

Hasta este punto se ha descrito un escenario en donde el uso de redes inalámbricas heterogéneas puede brindar un entorno de cobertura global. En este esquema de red, se requiere un mecanismo capaz de responder a las necesidades de comunicación de los usuarios, a través de la selección eficiente de redes, optimizando los recursos disponibles en éstas y el rendimiento de las aplicaciones.

Tradicionalmente, en un escenario homogéneo, la necesidad de *handoff* surge cuando la potencia de la señal de la estación base que actualmente soporta un servicio está por debajo de cierto umbral. Este escenario homogéneo está compuesto por células o áreas geográficas de cobertura en donde los operadores redirigen los flujos de información de los usuarios en función del movimiento de los mismos. La decisión de transferencia de flujos de tráfico se reduce a evaluar si es necesario iniciar o no el *handoff* y sobre cuál célula realizarlo.

En un entorno heterogéneo los usuarios pueden moverse entre diferentes accesos de red correspondientes a diferentes tecnologías como se muestra en la Figura 1.2. Esto para aprovechar las diferentes características de las redes que no pueden ser comparadas directamente (cobertura, ancho de banda, latencia, consumo de potencia, costo, etc.).

Como se ha mencionado, en la actualidad la selección de la red más adecuada se basa en información de la potencia o calidad de la señal. Establecer comparaciones basadas en esta medida omite la inclusión de las diferentes características inherentes a cada tecnología de red. Además, esta información no es suficiente si se consideran los diferentes requerimientos de QoS asociados a las aplicaciones. Estos aspectos disminuyen severamente la eficiencia del proceso de selección.

Por lo anterior, es necesario un marco de comparación en donde se pueda utilizar información, dinámica o estática, acerca de parámetros de rendimiento de las tecnologías. También es importante contar con información de los recursos disponibles en éstas para optimizar el desempeño de las diferentes aplicaciones. Pero, ¿cómo obtener información de las preferen-

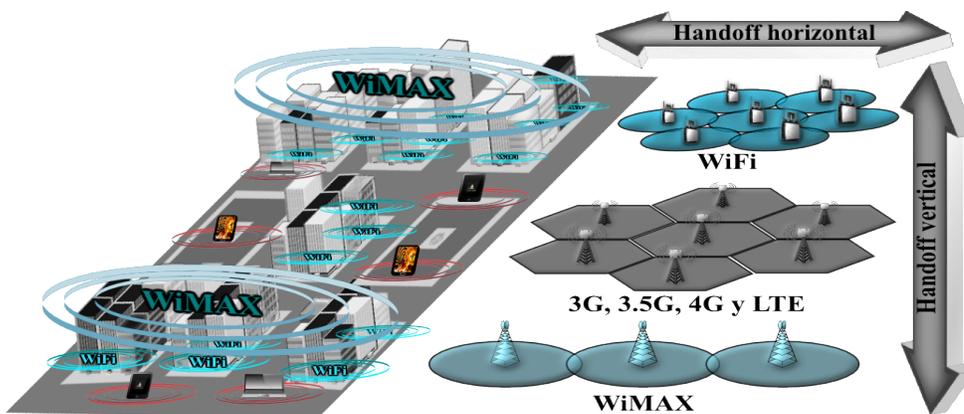


Figura 1.2: Escenario de red para la aplicación del mecanismo de decisión

cias y experiencias de los usuarios? ¿Qué información de las aplicaciones y de las condiciones de las redes resultan útiles? ¿Cómo interpretar esta información para seleccionar el punto de acceso más adecuado? La búsqueda de soluciones para estos y otros cuestionamientos ha dado lugar al concepto de *handoff vertical*.

#### 1.4.1. El proceso de *handoff vertical*

El *handoff vertical* puede definirse como un proceso para mejorar o mantener el rendimiento y la calidad en las aplicaciones de un dispositivo terminal. En este proceso las aplicaciones se mantienen activas mientras se realiza el cambio de punto de acceso. La principal diferencia entre el *handoff vertical* y el tradicional *handover*, es que en el primero se consideran y comparan redes de diferentes tecnologías para seleccionar a la mejor; en el segundo, sólo se seleccionan puntos de acceso pertenecientes a una misma tecnología [21]. Otra diferencia es que el *handoff vertical* puede ser activado por conveniencia y no necesariamente por razones de conectividad. Por ejemplo, un usuario puede requerir un servicio particular, o bien, preferir un sistema de tarificación específico. Esto da lugar a una clasificación de acuerdo a las razones que pueden motivar el proceso de *handoff* [3]:

***Handoff forzado o imperativo*** : Activados por eventos físicos de acuerdo a la disponibilidad de interfaces de red.

***Handoff de usuario o alternativo*** : Activado por políticas o bien por preferencias de usuario.

#### 1.4.2. Gestión del *handoff vertical*

La diversidad de los elementos involucrados en la realización del *handoff vertical* incrementa considerablemente su complejidad con respecto al tradicional *handover*. Esto ha dado lugar al desarrollo del concepto de *gestión de handoff*, que engloba todos aquellos aspectos relacionados con este proceso [3]. La Figura 1.3 muestra algunos de los aspectos como son escenarios de movilidad, fases de *handoff*, esquemas de control y medidas de desempeño. Los cuadros resaltados en gris muestran las características intrínsecamente relacionadas con la toma de decisión. La gestión del *handoff* es fundamental en el desarrollo de soluciones que brinden soporte a las comunicaciones en entornos heterogéneos.

Como se observa en la Figura 1.3, el concepto de gestión de *handoff* comprende tres fases:

***Iniciación***: También puede llamarse fase de reunión de información o descubrimiento del sistema. Consiste en coleccionar toda la información requerida para identificar la necesidad de *handoff* y poder subsecuentemente iniciarlo.

***Decisión***: Su función es procesar los datos proporcionados por la fase de iniciación para seleccionar el acceso de red más adecuado. Además, debe brindar instrucciones a la fase de ejecución.

---

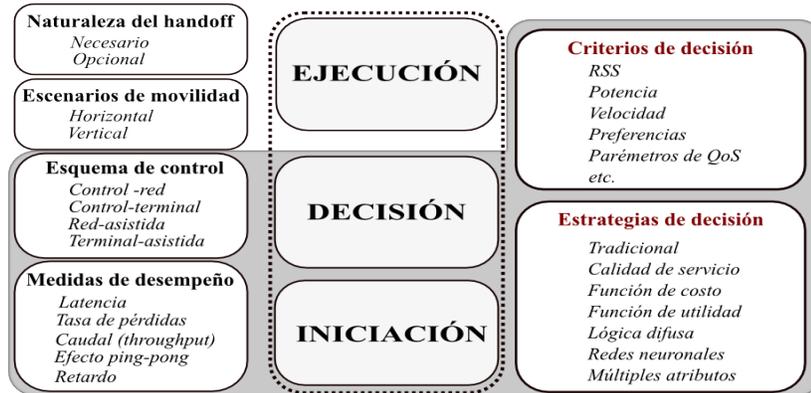


Figura 1.3: Aspectos principales en la gestión del *handoff* vertical

**Ejecución:** Esta fase es la encargada de realizar los cambios necesarios configurando parámetros de transmisión conforme a los detalles resueltos durante la fase de decisión.

### 1.4.3. Motivación para la decisión en el *handoff* vertical

Entre los problemas más desafiantes del proceso de *handoff* se encuentra la toma de decisión. Es especialmente importante debido a su contribución en el desempeño de este proceso.

La decisión es la encargada de seleccionar la red más apropiada para redirigir los flujos de tráfico de las aplicaciones activas. Ésta debe utilizar información de la terminal, de la red y del usuario para establecer un mecanismo óptimo que brinde garantías a los servicios de red.

Los aspectos incluidos en la decisión para establecer un marco de comparación entre redes heterogéneas se pueden agrupar de la siguiente manera:

**Relacionados con la red:** Cobertura, ancho de banda, latencia, calidad del enlace, relaciones de potencia (SINR, SNR, RSS, BER, etc.), costos monetarios, nivel de seguridad, etc.

**Relacionados con la terminal:** Velocidad, carga o capacidad de la batería, información de ubicación, etc.

**Relacionados con el usuario:** Perfiles y preferencias de usuario.

**Relacionados con el servicio:** Capacidades de servicio, requerimientos de QoS, etc.

Además, los criterios anteriores pueden ser clasificados como dinámicos o estáticos dependiendo de la frecuencia y causas de los cambios. Los perfiles de usuario y costos son considerados como estáticos, mientras que retardo, variabilidad del retardo, etc., son dinámicos.

---

En el siguiente capítulo se define el problema de decisión en el *handoff*, sus características y algunas de las estrategias propuestas en la literatura para resolverlo.

## 1.5. Estándar IEEE 802.21

Reunir información dinámica y estática de las redes para establecer conexiones selectivamente, puede lograrse a través del uso concurrente y estandarizado de puntos de acceso heterogéneos. Esto ha motivado el desarrollo de una arquitectura que facilite el *handoff* entre redes heterogéneas, sin interrumpir la continuidad a las sesiones activas en un nodo móvil [4].

Recientemente el estándar 802.21 también llamado MIH (*media independent handover*) ha sido finalizado siendo el primero en tratar con el proceso de *handoff* en redes heterogéneas. El estándar brinda un marco de trabajo para el descubrimiento eficiente de redes en cierto rango y la ejecución inteligente del *handoff* basado en las capacidades de los dispositivos terminales y en las condiciones actuales del enlace. Esto permite la continuidad y transparencia de los servicios durante el proceso de *handoff*, especificando los mecanismos para reunir y distribuir información de varios enlaces disponibles para la toma de decisión. Se espera que el estándar permita tanto a usuarios como a operadores tomar ventaja del traslape de diversas tecnologías de red.

En esta sección, después de introducir el modelo de referencia de 802.21, presentamos los servicios MIH. Además se resumen algunos aspectos importantes del estándar.

### 1.5.1. Modelo de referencia IEEE 802.21

El estándar 802.21 facilita una variedad de métodos para la realización del *handoff*, incluyendo tanto *handoffs* forzados (*hard handovers*) como los no forzados (*soft handovers*). Un *handoff* forzado, también conocido como *break-before-make handover*, implica una conmutación abrupta entre la terminal móvil y dos estaciones base o bien, entre dos puntos de acceso (PoA). Los *handoff* no forzados (*make-before-break handover*), requieren que se establezca una conexión con el PoA objetivo mientras aún se dirige tráfico a través de un PoA en servicio. En este tipo de *handoff* los nodos usuarios permanecen conectados brevemente a dos PoAs. Dependiendo de los requerimientos de QoS y los patrones de tráfico de las aplicaciones, los *handoff* forzados pueden no llegar a notarse [4].

Los principales elementos del estándar pueden ser clasificados en tres categorías como se muestra en la Figura 1.4 y se listan a continuación:

- Un marco para brindar continuidad y transparencia en los servicios mientras se conmuta entre redes heterogéneas.
  - Un conjunto de funciones que habilitan y asisten al proceso de *handoff*.
  - Un conjunto de puntos de acceso a servicios (*service access points* - SAP).
-

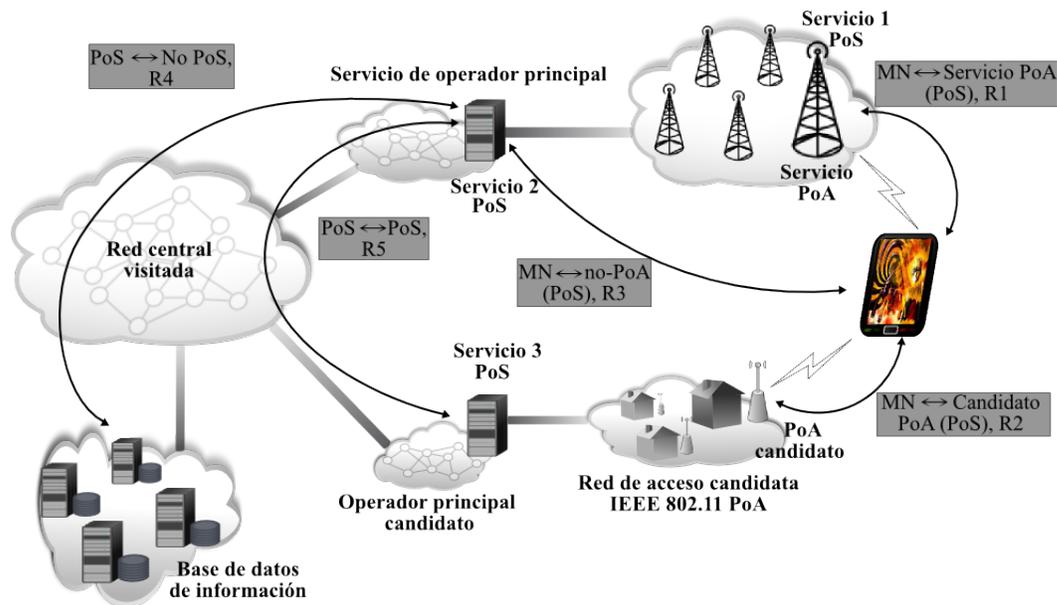


Figura 1.4: Modelo de referencia del estándar IEEE 802.21

### 1.5.2. Continuidad y transparencia en los servicios

IEEE 802.21 especifica un marco que habilita la transparencia y continuidad de un servicio mientras un nodo conmuta entre tecnologías de acceso heterogéneas. Las consecuencias de un *handoff* necesitan ser consideradas y comunicadas de manera temprana durante el proceso, antes de la ejecución de éste.

Es crucial que se asegure la continuidad del servicio durante y después de *handoffs* no forzados, sin la intervención del usuario. Para lograrlo, el estándar especifica mecanismos esenciales para reunir la información requerida para la asociación con un nuevo punto de acceso antes de finalizar la conexión actual. Aún en el proceso de *handoff* forzado es posible establecer señalización para informar y prevenir a la entidad encargada de la selección, acerca de la falta de soporte de los requerimientos de QoS o de la capacidad disponible en un acceso de red candidato.

Aplicaciones tales como VoIP, son típicamente las más demandantes en términos de latencia de *handoff*, y las llamadas VoIP de alta calidad sólo pueden ser atendidas por *handoffs* no forzados. Mientras que el streaming puede someterse a un *handoff* forzado siempre que el retardo no exceda el intervalo de retardo del buffer. Por otro lado, el incremento en el retardo, variabilidad del retardo o tasa de pérdidas de paquetes puede degradar el caudal de datos (*throughput*), en la red que actualmente brinda el servicio, lo que para ciertas aplicaciones puede motivar la activación del proceso de *handoff*.

### 1.5.3. Funciones para el soporte del *handoff*

El estándar IEEE 802.21 define un conjunto de funciones cuya finalidad es habilitar el proceso de *handoff*. La especificación de estas funciones hace referencia a las pilas de protocolo correspondientes a las tecnologías de red existentes, introduciendo una nueva entidad lógica llamada *función MIH* (*media independent handover function* - MIHF).

La MIHF reside lógicamente entre las capas de enlace y de red. Esto brinda servicios abstraídos a entidades residentes encima de la capa de red llamados *usuarios MIH* (MIH-users). Los MIHU realizan anticipadamente el *handoff* y la selección del enlace basados en políticas internas, contexto y en la información recibida de la MIHF. Para este fin, el rol primario de la MIHF es asistir al proceso de *handoff*, proporcionando toda la información necesaria para las entidades de selección de red y de gestión de movilidad. Estas últimas son responsables de la decisión en el *handoff*, ya que la MIHF no se encarga de tomar ninguna decisión en la selección de la red.

### 1.5.4. Puntos de acceso a los servicios MIH

Los SAP o puntos de acceso a servicio, brindan a los MIHU primitivas para el acceso a los siguientes servicios MIHF:

**Media-independent event service** . El servicio de eventos MIH (MIES), proporciona un reporte acerca de la ocurrencia de cambios dinámicos en las condiciones del estado del enlace y en la calidad del mismo. En los eventos de cambio de estado en la capa *MAC* y *PHY*, los más característicos son los eventos *LinkUp* y *LinkDown*, los cuales son generados cuando una conexión con un punto de acceso se establece o se termina, respectivamente. Otro evento llamado *LinkDetected*, indica que un PoA ha sido detectado sin establecer conexión aún. Un mensaje denominado *LinkParametersReport* puede ser enviado cuando un MIHU ha fijado umbrales para ciertos parámetros, por ejemplo, para la potencia de la señal recibida (RSSI), en enlaces 802.11. Así cuando se cruza el umbral pueden tomarse las acciones correspondientes. Además, un *LinkParametersReport* es también usado para notificaciones periódicas acerca de las condiciones del enlace, por lo que esta información puede asistir el proceso de toma de decisión. Los eventos pueden ser locales o remotos, siendo estos últimos obtenidos de una entidad MIHF externa considerada como un par (*peer*).

**Media-independent command service** . El servicio de comandos MIH (MICS), habilita los MIHU para administrar y controlar los parámetros relacionados con el comportamiento del enlace y de los *handoffs*. MICS proporciona un conjunto de comandos para realizar lo anterior. Los comandos pueden ser locales o remotos. La información obtenida con MICS es dinámica.

**Media-independent information service** . El servicio de información MIH (MIIS), permite a los MIHUs recibir información estática acerca de las características y servicios

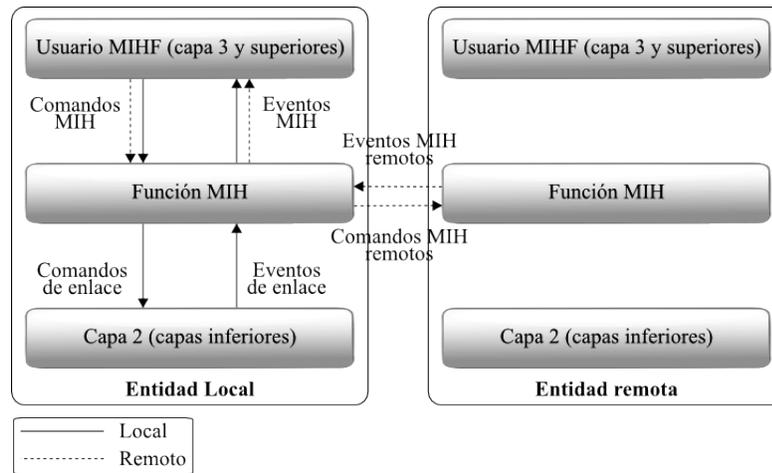


Figura 1.5: Flujo de información entre los servicios de *información, comandos y eventos*

de la red actual, pero también de otras redes disponibles en un cierto rango. Esta información puede usarse para asistir la toma de decisión.

La Figura 1.5, ilustra el flujo de información entre los servicios proporcionados por el estándar MIH. El alcance de IEEE 802.21 sólo incluye la operación de la MIHF y las primitivas asociadas con las interfaces entre MIHF y otras entidades. Una sola interface independiente del medio entre MIHF y MIHU (MIH-SAP) es suficiente.

## 1.6. Motivación, contribución y estructura del trabajo

En un escenario de red actual, las tecnologías de acceso inalámbrico juegan un papel fundamental. La interacción e integración de éstas ha de caracterizar a los sistemas de comunicación de siguiente generación. En éstos el uso colectivo de tecnologías cableadas e inalámbricas, permitirá proporcionar servicios óptimos en cualquier momento y en cualquier lugar.

En tal contexto, uno de los aspectos más relevantes es cómo lograr la interacción o integración de redes heterogéneas. Es decir, cómo aprovechar los diferentes atributos de cada tecnología para optimizar el desempeño de las aplicaciones y servicios en red.

El proceso de *handoff* vertical puede representar una de las propuestas de solución más sólidas para hacer frente a este problema. Este proceso está constituido por tres fases: *iniciación, decisión y ejecución*. El estándar IEEE 802.21 surge como un esfuerzo para brindar soporte a la fase de iniciación y de ejecución. El desarrollo de algoritmos de decisión no se considera en el estándar y se deja como un tema de investigación abierto.

El objetivo general de este proyecto es desarrollar un algoritmo de decisión para el *handoff* vertical. Para tal efecto, se considera el mecanismo propuesto en [21], basado en los procesos analíticos jerárquicos. Este mecanismo, resuelve el problema en el que dos aplicaciones activas en un dispositivo móvil establecen un acuerdo para seleccionar la mejor de sólo dos redes

alternativas. Un objetivo particular, es extender la aplicación de este método original al incluir tres sesiones activas y más de dos redes alternativas.

### 1.6.1. Contribución

La contribución de esta investigación es la propuesta y evaluación de un método mejorado para la toma de decisión en el *handoff* vertical. Proponemos una solución al problema de seleccionar la mejor red cuando un dispositivo móvil presenta tres aplicaciones activas y la cantidad de redes alternativas varía entre 2 y 15.

El proceso de selección se modela como un problema de decisión en grupo en el que el objetivo es seleccionar la red que mejor se ajuste a las necesidades individuales de las aplicaciones asociadas a las clases de servicio conversacional, interactivo o *streaming*.

El algoritmo propuesto establece un acuerdo entre las aplicaciones partiendo de la especificación de los requerimientos mínimos de QoS de los parámetros de rendimiento especificados en el estándar IEEE 802.21. Esto facilita su implementación en un escenario que cuente con la infraestructura de dicho estándar.

El algoritmo puede ser aplicado en escenarios de red en donde los requerimientos de QoS sean distintos a los considerados en este trabajo.

### 1.6.2. Estructura del trabajo

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presenta una revisión del estado del arte acerca de las estrategias de toma de decisión y se realiza una comparación cualitativa de las soluciones más representativas encontradas en la literatura. En el capítulo 3, se describe el mecanismo de decisión basado en procesos analíticos jerárquicos propuesto en [21]. En el capítulo 4, se presenta una extensión de esta propuesta, además de las modificaciones realizadas para la mejora de la misma. Finalmente en los capítulos 5 y 6, se incluyen los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas y las conclusiones, respectivamente.

---



# Fase de decisión en el *handoff* vertical: *estado del arte*

---

El objeto de investigación de este trabajo es la fase de decisión dentro del proceso de *handoff* vertical. Por esta razón, en este capítulo se describen los principales enfoques propuestos en la literatura para abordar este tema clasificándolos dentro de cuatro categorías:

- Basados en funciones de costo-utilidad.
- Basados en calidad de servicio.
- Basados en múltiples atributos.
- Basados en lógica difusa.

En la subsección final en la Tabla 2.1, se comparan algunas de sus características.

## 2.1. Enfoque basado en funciones de costo-utilidad

En el contexto del *handoff*, las funciones de costo y de utilidad, son medidas del beneficio obtenido al cambiar de red. En un esquema de costos, el mecanismo de toma de decisión se modela como un problema de optimización, en donde cada red disponible tiene asociada una función de costo. Así, la decisión se toma seleccionando la red cuyo costo derivado de la función sea menor. Dos de las propuestas más representativas y citadas en la literatura son [17] y [18].

En [17], se presentan dos esquemas para optimizar el proceso de *handoff* a través de una función de costo que sólo depende de criterios como ancho de banda, retardo y requerimientos de potencia. El primer esquema realiza el *handoff* colectivamente, es decir, todas las sesiones activas son llevadas a un acceso de red común. El segundo esquema prioriza las sesiones, optimizando el proceso de decisión de *handoff* de manera individual, por lo que las sesiones pueden ser redirigidas de forma aislada a diferentes accesos. En [17], se consideran varias sesiones activas simultáneamente en la misma terminal, pero no se considera un compromiso entre los diferentes requerimientos de QoS asociados a cada clase de tráfico. De hecho, la única medida evaluada para la calidad de servicio es el ancho de banda. El alcance de una función

de costo depende de la cantidad de aspectos que ésta considere como el tipo de servicio, esquema de tarificación, condiciones de la red y del dispositivo móvil, desempeño del sistema, preferencias del usuario, etc. Sin embargo, la complejidad de la función se incrementa entre más elementos se incluyan. Así, es necesario establecer un compromiso entre el número de aspectos considerados y la complejidad del modelo.

Un complemento de las funciones de costo son las funciones de *utilidad*, en las que las preferencias de los usuarios se relacionan con parámetros de la red. Cuando un usuario consume algún servicio de comunicación, acepta un esquema de tarificación esperando percibir cierta calidad en dicho servicio. Así, la premisa debería ser la de satisfacer los requerimientos de QoS a un precio mínimo. Para asegurar ofrecer calidad en el servicio, la red se encarga de controlar ciertos parámetros funcionales transparentes para el usuario (ancho de banda, retardo, variabilidad del retardo, etc.). Sin embargo, estos parámetros no reflejan la satisfacción del usuario. Un usuario toma decisiones de acuerdo a la satisfacción experimentada o percibida, que es completamente subjetiva pero puede modelarse como una función de utilidad. La elección de una función que modele adecuadamente las preferencias de los usuarios en un entorno de red caracterizado por la incertidumbre y la variabilidad, es un verdadero reto. Por lo anterior, asumir ciertas condiciones puede ayudar a establecer umbrales que den forma a una función de utilidad, restando generalidad al modelo. En [18], se propone una función de utilidad en la cual se considera como única restricción el tiempo de espera del usuario. Se estima el tiempo de envío de un archivo completo en cada red disponible, seleccionando la más prometedora para satisfacer las restricciones impuestas por el usuario, en términos de tiempo de transferencia.

## 2.2. Enfoque basado en calidad de servicio

En la selección de una red los parámetros de calidad de servicio juegan un papel crucial debido a su gran impacto en la asignación de recursos. Bajo este contexto, desarrollar un algoritmo de decisión que optimice el uso de los recursos brindando soporte a los requerimientos de QoS, es un problema complejo por solucionar. La decisión en el *handoff* puede complementarse con procedimientos de control de admisión de conexiones. Éstas pueden ser rechazadas por una red si se determina que la admisión correspondiente puede degradar la calidad en el servicio de las conexiones existentes en el punto de acceso; las solicitudes de admisión rechazadas deben ser canalizadas a otra red para solicitar una conexión y recomenzar el proceso de admisión. En [15] se presenta un esquema de control de admisión junto con un algoritmo de *handoff* vertical que se realiza entre redes WiFi y WiMAX. En [16] se propone un algoritmo de particionamiento virtual con prevención de admisión entre redes 3G y WiMAX que considera servicios en tiempo real y no real. La asignación de prioridades se realiza clasificando a los usuarios como nuevos y aquellos que realizan un *handoff*.

---

## 2.3. Enfoque basado en múltiples atributos

La toma de decisión en el proceso de *handoff* se puede plantear como la aplicación de *criterios* para elegir una red dentro de un conjunto finito de *alternativas*, caracterizadas en términos de sus *atributos*. Este es un problema común de toma de decisión con múltiples atributos conocido como MADM (*multiple attribute decision making*).

Los problemas MADM son diversos, no obstante todos comparten las mismas características listadas a continuación:

- **Alternativas.** Definen un conjunto finito de opciones que son clasificadas utilizando ciertos criterios.
- **Atributos.** Proporcionan un medio para establecer un marco de comparación entre las alternativas. Estos pueden ser cualitativos o cuantitativos.
- **Pesos.** La importancia relativa de cada atributo debe ser ponderada y comparada.

Al aplicar un método MADM se establece un compromiso entre los atributos asociados a las alternativas. En [19] los autores clasifican los métodos MADM de acuerdo al tipo de información que utilizan como se muestra en la Figura 2.1. En las siguientes subsecciones se describen algunos de los métodos MADM más populares.

En general, los métodos MADM no están diseñados para su aplicación directa en problemas caracterizados por la variación temporal de los atributos de las alternativas. Por esta razón, su aplicación para resolver la decisión en el *handoff* vertical se ha estudiado como un problema determinístico [17]. Sin embargo, en [21] un algoritmo MADM de carácter probabilístico se propone y se valida. Este algoritmo incorpora dos tipos de incertidumbre, la primera relacionada con el compromiso entre los requerimientos de QoS asociados a diferentes clases de servicio, y por otro lado, la incertidumbre inherente a las medidas absolutas correspondientes a las condiciones de cada red. En el capítulo 3 se analiza a detalle este algoritmo.



Figura 2.1: Taxonomía general de los métodos MADM

**Método SAW (*simple additive weighting*).** En este algoritmo, el peso o prioridad de cada red se obtiene sumando sobre el número total de parámetros la contribución normalizada de cada métrica multiplicada por la ponderación asignada a cada una de éstas. Se utiliza una matriz rectangular, denominada matriz de decisión. Las dimensiones de la matriz de decisión están dadas por el número de alternativas, para las filas, y el número de atributos, para las columnas. Además, se requiere una escala de valores de comparación en donde las relaciones alternativas-atributos se mapean, es decir, que las relaciones son ponderadas en términos de dicha escala, luego los valores resultados del mapeo son colocados en la matriz. Un proceso de normalización particular para cada elemento de la matriz se realiza en función de si el elemento representa un costo o un beneficio [13].

**Método TOPSIS (*technique for order preference by similarity to ideal solution*).** Está basado en el principio de que la alternativa elegida debe ser la más cercana a la solución ideal y la más lejana del peor caso de solución. La solución ideal se obtiene identificando los valores óptimos para cada atributo, lo que resulta en un vector óptimo de criterios, que se compara con el vector de atributos asociado a cada red para determinar un factor de similitud. Se selecciona aquella red cuyo factor de similitud sea mayor. La serie de pasos que sigue el algoritmo TOPSIS es:

1. Construir una matriz de decisión normalizada en base a los atributos identificados.
2. Construir una matriz de pesos normalizada a partir de la matriz anterior.
3. Determinar las matrices de las soluciones ideales y las ideales negativas utilizando parámetros de costo y beneficio.
4. Comparar la matriz de (2) con las dos matrices de (3), estableciendo dos medidas de separación.
5. Calcular un factor de similitud respecto a la solución ideal a partir de las dos medidas de (4).
6. Al concluir los pasos anteriores, cada red tendrá asociado un factor de similitud y simplemente se escoge el de mayor magnitud.

**Método GRA (*grey relational analysis*).** En este método se establece una clasificación de las redes candidatas y se selecciona la mejor clasificada. Entonces, se construyen relaciones de Grey entre los elementos de dos series para comparar cada miembro de manera cuantitativa. Una de las series se compone de entidades con las mejores cualidades, mientras que la otra serie contiene entidades comparativas. Un coeficiente relacional Grey se calcula de acuerdo a un nivel de similitud y variabilidad, y se usa para describir las relaciones entre las series. En general GRA se compone de seis pasos:

1. Clasificar los elementos de las series en términos de altamente-mejor, apenas-mejor y nominalmente-mejor.
  2. Definir los umbrales bajo, medio y alto de las series de elementos.
-

3. Normalizar las entidades individuales.
4. Definir la serie ideal.
5. Calcular el coeficiente relacional Grey.
6. Seleccionar la alternativa con mayor coeficiente relacional.

**Método ELECTRE** (*elimination and choice translating priority*). Se usa un vector de atributos como referencia para ajustar los valores de los atributos asociados a las redes alternativas, antes de que éstas sean comparadas. Las diferencias entre atributos se llevan a una matriz de decisión, en donde se usa la mínima diferencia para un proceso de normalización. Después, la importancia relativa de cada atributo se considera para la toma de decisión. Factores de concordancia y discordancia, que son medidas de satisfacción y frustración, se utilizan para comparar las redes alternativas. Estos dos factores se manipulan en forma de matrices, para calcular dos índices, el de concordancia que indica el grado de dominio de una alternativa respecto de otras, y el índice de discordancia, que es una medida del grado de debilidad de una alternativa respecto de las otras. Finalmente la selección de la mejor alternativa puede estar basada ya sea en la identificación de aquella red con el mayor índice de concordancia y el menor índice de discordancia, o bien tomando el máximo valor del promedio de estos dos índices.

**Método AHP** (*analytic hierarchy process*). En este método el problema objetivo se descompone en *subproblemas* menos complejos, que contribuyen a la resolución del problema general, o en *atributos* que describen aspectos cualitativos o cuantitativos de los subproblemas y del objetivo. Cada subproblema o atributo se considera un *elemento de decisión*.

Las relaciones de dependencia entre elementos de decisión se representan en una estructura jerárquica denominada *árbol de decisión* como se muestra en la Figura 2.2 [20]. Generalmente se compone de los siguientes pasos:

1. Identificar los elementos de decisión involucrados en la resolución de un problema.
2. Colectar información acerca de los elementos de decisión.
3. Estructurar jerárquicamente los elementos de decisión estableciendo relaciones de dependencia.
4. Comparar por pares el grado de importancia de los elementos en cada nivel del árbol respecto a cada elemento del nivel superior inmediato.
5. Representar en matrices las relaciones de importancia.
6. Sintetizar vectores de prioridad locales y finalmente el vector de prioridad global.

En el capítulo 3 se analiza a detalle el método AHP y se describe su aplicación propuesta en [21] para resolver la decisión en el *handoff* vertical.

---

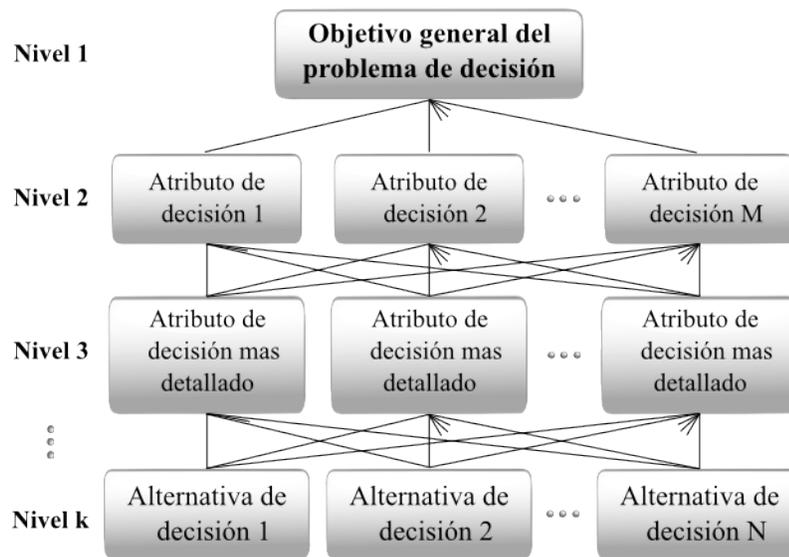


Figura 2.2: Estructura general del árbol de decisión del método AHP

## 2.4. Enfoque basado en lógica difusa

En la toma de decisión se introduce un alto grado de imprecisión al asignar ponderaciones cualitativas a los criterios de selección. Por ejemplo, siendo el tiempo de duración de un servicio un criterio de selección, éste puede ser descrito como *bajo*, *medio*, *alto*, *muy alto*. Los conceptos de la teoría de lógica difusa se han utilizado para proponer un nuevo mecanismo de decisión en el *handoff*. Sin embargo, su uso se ha combinado y complementado con algoritmos clásicos MADM, con la intención de brindar una herramienta de análisis que pueda procesar datos difusos caracterizados por la imprecisión. Así un algoritmo MADM difuso no sólo permite trabajar con información imprecisa sino que además puede contemplar múltiples criterios o atributos simultáneamente. Ahora bien, los tipos de datos usados en los métodos MADM difusos, pueden ser todos difusos, todos precisos o bien una combinación de ambos. De esta manera, dependiendo de estos, es posible aplicar métodos de análisis directos. Sin embargo, estos métodos son muy complejos, por lo que es preferible utilizar una función de conversión para mapear datos difusos a datos precisos. Un enfoque utilizado por Zhang en [24], se compone de dos fases; la primera es para convertir los datos difusos en números precisos, y en la segunda fase se utiliza un MADM clásico. Sin embargo, los datos difusos pueden ser convertidos a números difusos a través de una escala de conversión y una función de correspondencia (*membership function*), y después usar un método difuso de evaluación (*fuzzy scoring*), para convertir cada número difuso en un número preciso. Existen diferentes escalas de conversión asociadas a términos lingüísticos diferentes. Así, un mismo término lingüístico bajo escalas diferentes, puede corresponder a diferentes valores precisos. Hasta este punto, hemos descrito las estrategias más estudiadas y utilizadas para hacer frente al problema de la toma de decisión en el *handoff*.

## 2.5. Comparación cualitativa de los enfoques de decisión

La Tabla 2.1 resume la comparación cualitativa de las estrategias de decisión encontradas en la literatura.

Un aspecto fundamental es el *esquema de control*, es decir, en dónde se ha de desarrollar el proceso de decisión para ejecutar el *handoff*, algunas alternativas se describen en [5-10]. Las estrategias basadas en funciones de costo-utilidad, o en múltiples criterios (MADM y lógica difusa), son más flexibles al respecto. En su mayoría estas propuestas consideran el uso de los servicios proporcionados por el estándar 802.21 que brinda una infraestructura orientada al intercambio de información entre redes y dispositivos móviles.

Otro aspecto de suma importancia es el compromiso entre parámetros de calidad de servicio. Gran cantidad de propuestas sólo contemplan hasta dos aplicaciones asociadas a diferentes clases de servicio. Aunado a esto, se incluye un único parámetro como criterio de decisión, por ejemplo el ancho de banda disponible.

Finalmente, los parámetros que se observan en la decisión del *handoff*, pueden ser clasificados como funcionales o no funcionales, dependiendo de la naturaleza de éstos. Los funcionales están asociados con la estabilidad y el desempeño de los algoritmos vistos como sistemas. Los no funcionales se refieren a aspectos subjetivos indirectamente relacionados con estos algoritmos, tales como la confiabilidad y la satisfacción de los usuarios.

Tabla 2.1: Comparación de las características cualitativas de algunas estrategias de decisión para el *handoff* vertical

Característica	Mecanismo					
	Tradicional	QoS	Función de costo	Función de utilidad	MADM	Lógica difusa
<b>Esquema de control</b>	Terminal	Red	Terminal	Red-Terminal	Red-Terminal	Red-Terminal
<b>Compromisos de QoS</b>	Nulo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
<b>Probabilístico</b>	Nulo	Nulo	Nulo	Nulo	Reciente	Nulo
<b>Complejidad</b>	Baja	Alta	Alta	Alta	Media	Media
<b>Sesiones activas</b>	1	2	2	2	2	2
<b>Servicios</b>	TR	TR-TnR	TR-TnR	TR-TnR	TR-TnR	RT-nRT
<b>Medidas</b>	Fn	Fn-nFn	Fn-nFn	Fn-nFn	Fn-nFn	Fn-nFn
<b>Preferencias de usuario</b>	Nulo	Alta	Media	Media	Media	Media

Abreviaturas. TR: tiempo real, TnR: tiempo no real, Fn: funcional, nFn: no funcional



# Acuerdo en el proceso de selección basado en AHP

---

En este capítulo se analiza el algoritmo propuesto en [21] para resolver el problema de selección en el *handoff* vertical. El enfoque de solución plantea el problema como una toma de decisión en grupo con múltiples atributos (MADM). La propuesta se compone de dos partes: la primera, descrita en la sección 3.1, utiliza el método AHP para clasificar las redes alternativas de acuerdo a las preferencias de las aplicaciones activas en un dispositivo móvil. La segunda parte, una extensión probabilística de AHP propuesta en [25], brinda una estimación de la certidumbre en la clasificación.

## 3.1. Aplicación del método AHP en el *handoff* vertical

En la sección 2.3 se han enunciado las características generales del método AHP así como su procedimiento básico de aplicación. En esta sección se describe, cómo a través de AHP, los criterios cuantitativos y cualitativos son considerados en la toma de decisión.

### 3.1.1. Estructura jerárquica de los elementos de decisión

El primer paso en cualquier método MADM es establecer los elementos que intervienen en el problema de decisión. Los elementos que se consideran en [21] para la toma de decisión dentro del *handoff* son los siguientes:

- **Objetivo.** Seleccionar la red que mejor se ajuste a las *preferencias* de las aplicaciones o sesiones de comunicación activas en un dispositivo móvil.
- **Criterios.** Las preferencias de las aplicaciones se definen en términos del retardo, variabilidad del retardo, tasa de pérdidas por paquete (PER), tasa de envío y el precio asociados a cada red. Estos parámetros se utilizan como *atributos* y permiten comparar las redes alternativas.
- **Alternativas.** El conjunto finito de redes, de diferentes tecnologías, que representan las opciones dentro de las cuales se puede elegir.

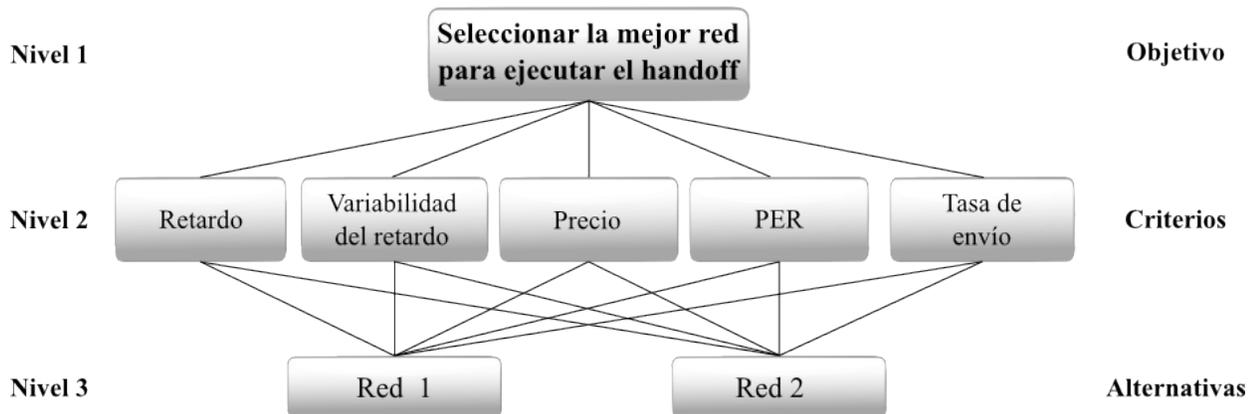


Figura 3.1: Estructura jerárquica de los elementos de decisión para el método de *handoff* propuesto en [21]

El objetivo, los criterios y las alternativas, deben ser llevados a una estructura jerárquica llamada *árbol de decisión*. Esta estructura permite establecer las relaciones de dependencia existentes entre los elementos de decisión identificados. En la Figura 3.1 se muestra el árbol de decisión propuesto en [21].

Observemos que en el nivel superior del árbol se ubica el objetivo general que es seleccionar la mejor red, mientras que en el nivel inferior se ubican las dos redes que definen el conjunto de alternativas. Sólo se considera un nivel intermedio entre el objetivo y las alternativas, en el que se definen como *criterios* o atributos el precio, tasa de envío, retardo, PER y variabilidad del retardo.

Una vez especificado el modelo jerárquico se pueden evaluar los criterios, estableciendo prioridades entre ellos, y las alternativas. Este procedimiento se describe en la siguiente subsección.

### 3.1.2. Prioridades entre los elementos de la jerarquía

Una vez especificadas las relaciones de dependencia entre el objetivo y los elementos de decisión se puede determinar la *importancia relativa* de estos últimos.

La relatividad en la importancia se debe a que todos los elementos en cada nivel de la jerarquía son comparados *por pares* con respecto a cada elemento en un nivel superior inmediato. Por ejemplo, pensemos en dos criterios o atributos, digamos  $\beta_1$  y  $\beta_2$  ubicados en el nivel  $i$  de un árbol de decisión. Esta pareja de criterios es comparada respecto a los criterios  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  en el nivel  $i - 1$ , es decir, el nivel inmediatamente superior a  $i$ . En términos de  $\alpha_1$ , puede ocurrir que  $\beta_1$  sea más importante que  $\beta_2$ , sin embargo, en términos de  $\alpha_2$  la relación de importancia no necesariamente es la misma.

Las comparaciones también son llamadas *juicios* ya que en cada una de éstas, se evalúa cuáles elementos son más importantes. Si los elementos o criterios que se comparan no son cuantificables o medibles entonces los juicios son subjetivos, en cuyo caso el grado de importancia se expresa en términos de una *escala de ponderación*. Así, al comparar dos elementos, el que decide debe preguntarse cuál de éstos es más importante y qué grado de importancia

le corresponde. En la Tabla 3.1 se muestra una de las escalas de ponderación comúnmente utilizada en AHP.

Tabla 3.1: Escala de ponderación comúnmente utilizada en el método AHP

Intensidad	Definición de importancia
1	Igual importancia
3	Importancia moderada
5	Fuerte importancia
7	Muy fuerte importancia
9	Extrema importancia
2, 4, 6, 8	Valores intermedios

En [21], la escala de juicio anterior se utiliza para expresar las relaciones entre los criterios y el objetivo, considerando que el acuerdo entre las aplicaciones para la selección se encuentra implícito en el objetivo. Antes de establecer un acuerdo entre las aplicaciones es fundamental conocer las preferencias individuales de éstas acerca de los criterios. Por ejemplo, para una aplicación conversacional, en [23, 21] se proponen las relaciones de importancia mostradas en la Tabla 3.2.

La información obtenida de evaluaciones, como las de la tabla 3.1, debe ser concentrada en *matrices de comparación*, para lo cual se utiliza una notación especial. Si en un nivel del árbol de decisión los criterios  $i$  y  $j$  son comparados entonces el elemento  $i, j$  de la matriz de comparación por pares está dado por  $r_{ij} = \omega_i/\omega_j$  que expresa la relación de importancia entre ambos. Además, la relación inversa está dada por  $r_{ji} = \omega_j/\omega_i$ . Al utilizar la escala de la Tabla 3.1 los posibles valores de  $\omega \in \{1, 2, \dots, 9\}$ . Así, si el criterio  $i$  es más importante que el  $j$ , entonces  $\omega_i \in [2, 9]$  y  $\omega_j = 1$ , en caso contrario,  $j$  más importante que  $i$ ,  $\omega_j \in [2, 9]$  y  $\omega_i = 1$ . Si se considera que dos criterios  $i$  y  $j$  son igualmente importantes entonces  $\omega_i = \omega_j = 1$ .

Tabla 3.2: Comparaciones de los criterios en términos de la clase de servicio conversacional

No. comparación <sup>†</sup>	Criterio 1	Relacion de importancia	Criterio 2
1	Precio	<i>muy fuertemente importante</i> sobre	Tasa de envío
2	Precio	<i>muy fuertemente importante</i> sobre	PER
3	Precio	<i>tan importante</i> como	Variabilidad del retardo
4	Precio	<i>tan importante</i> como	Retardo
5	Retardo	<i>muy fuertemente importante</i> sobre	Tasa de envío
6	Retardo	<i>muy fuertemente importante</i> sobre	PER
7	Retardo	<i>tan importante</i> como	Variabilidad del retardo
8	Variabilidad del retardo	<i>muy fuertemente importante</i> sobre	Tasa de envío
9	Variabilidad del retardo	<i>muy fuertemente importante</i> sobre	PER
10	Tasa de envío	<i>tan importante</i> como	PER

<sup>†</sup> Debido a que las comparaciones son por pares, en general únicamente se requieren  $n(n-1)/2$ , siendo  $n$  el número de criterios en un nivel de la jerarquía.

En la Tabla 3.3 se reúnen las matrices de comparación, propuestas en [23] y reutilizadas en [21], que muestran las relaciones de importancia de los criterios en términos de las diferentes clases de servicio. Los elementos de los triángulos inferiores de las matrices son los recíprocos de los triángulos superiores. Estas relaciones establecen cuáles criterios son más o menos importantes según la naturaleza de las aplicaciones. Las ponderaciones incluidas en la tabla surgen de un análisis enteramente subjetivo e independiente para cada aplicación.

Hasta este punto se ha descrito la evaluación cualitativa de las relaciones entre los criterios y el objetivo. Sin embargo, AHP puede combinar información cualitativa y cuantitativa. Si los criterios son cuantificables entonces el marco de comparación entre éstos no utiliza la escala de ponderación.

Observemos que los criterios mostrados en la Figura 3.1, son cuantitativos con respecto a las alternativas. Por lo tanto, la comparación entre las redes se realiza a través de las magnitudes de los criterios o atributos medidos directamente de éstas. Para poder comparar las medidas obtenidas de las alternativas es necesario incluir un proceso de normalización. En [21] antes de aplicar el proceso de normalización los criterios precio, retardo, variabilidad en el retardo y PER se clasifican como *costos* mientras que la tasa de envío se considera un *beneficio*.

Tabla 3.3: Relaciones de importancia entre los criterios para cada clase de servicio

Conversacional						Interactivo					
Criterio	Criterio					Criterio	Criterio				
	C1	C2	C3	C4	C5		C1	C2	C3	C4	C5
C1	1/1	7/1	1/1	7/1	1/1	C1	1/1	3/1	3/1	1/3	7/1
C2		1/1	1/7	1/1	1/7	C2		1/1	1/1	1/5	5/1
C3			1/1	7/1	1/1	C3			1/1	1/5	5/1
C4				1/1	1/7	C4				1/1	7/1
C5					1/1	C5					1/1

Streaming						Background					
Criterio	Criterio					Criterio	Criterio				
	C1	C2	C3	C4	C5		C1	C2	C3	C4	C5
C1	1/1	1/1	3/1	7/1	1/1	C1	1/1	3/1	7/1	1/3	7/1
C2		1/1	3/1	7/1	1/1	C2		1/1	5/1	1/5	5/1
C3			1/1	3/1	1/3	C3			1/1	1/9	1/1
C4				1/1	1/7	C4				1/1	9/1
C5					1/1	C5					1/1

C1: precio, C2: tasa de envío, C3: retardo, C4: PER, C5: variabilidad del retardo

Entre mayor es el valor del criterio considerado beneficio, mayor es el grado de preferencia. Para los costos, entre mayor es el valor del criterio, menor es el grado de preferencia.

Para comenzar con la descripción del proceso de normalización definamos la matriz de comparación  $\mathbf{X}_{m \times n}$  cuyos elementos representan *mediciones* de los  $m$  criterios obtenidas de las  $n$  redes alternativas. Así, cada elemento  $x_{i,j}$  corresponde a la medida del  $i$ -ésimo criterio asociada a la  $j$ -ésima alternativa. La matriz  $\mathbf{X}_{m \times n}$  puede expresarse como la composición de dos matrices, una de costos y una de beneficios, como se expresa en la ecuación 3.1.

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m,1} & \cdots & x_{m,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m_b,1} & \cdots & x_{m_b,n} \\ x_{m_b+1,1} & \cdots & x_{m_b+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m_b+m_c,1} & \cdots & x_{m_b+m_c,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{m_b \times n} \\ \mathbf{X}_{m_c \times n} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

donde  $m_c$  es el número de criterios considerados costos,  $m_b$  es el número de criterios considerados beneficios y  $n$  es el número de alternativas. Notemos que  $m = m_c + m_b$ .

La normalización de los criterios considerados beneficios está dada por la ecuación 3.2

$$r_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\hat{x}_i} \quad ; i \in 1, \dots, m_b, \quad j \in 1, \dots, n \quad (3.2)$$

donde  $r_{i,j}$  es el valor normalizado del atributo  $x_{i,j}$ ;  $\hat{x}_i$  es el máximo valor del  $i$ -ésimo vector fila de la matriz  $\mathbf{X}_{m_b \times n}$ ,

La normalización para los costos está dada por la ecuación 3.3

$$r_{i,j} = \frac{\tilde{x}_i}{x_{i,j}} \quad ; i \in 1, \dots, m_c, \quad j \in 1, \dots, n \quad (3.3)$$

donde,  $\tilde{x}_i$  es el mínimo valor del  $i$ -ésimo vector columna en la matriz  $\mathbf{X}_{m_c \times n}$ .

En la Tabla 3.4 se muestran dos ejemplos de procedimientos de normalización aplicados a un conjunto de medidas asociadas a un criterio considerado costo. El primero es un método convencional, mientras que el segundo aplica la ecuación 3.3.

Tabla 3.4: Normalización de un conjunto de medidas asociadas a un criterio considerado costo

Alternativa	Procedimiento 1			Procedimiento 2				
	Valores medidos		Valores normalizados	Valores medidos			Valores normalizados	
<b>A1</b>	34	34/113 =	0.3010	34	24/34 =	0.7059	0.7059/3.4519 =	0.2045
<b>A2</b>	27	27/113 =	0.2390	27	24/27 =	0.8889	0.8889/3.4519 =	0.2575
<b>A3</b>	24	24/113 =	0.2120	24	24/24 =	1.000	1.000/3.4519 =	0.2897
<b>A4</b>	28	28/113 =	0.2480	28	24/28 =	0.8571	0.8571/3.4519 =	0.2482
	<b>113<sup>†</sup></b>		<b>1.0</b>	<b>24<sup>‡</sup></b>		<b>3.4519<sup>†</sup></b>	<b>1.0</b>	

<sup>†</sup> Se suman los valores de la columna; <sup>‡</sup> Se toma el mínimo valor de la columna.

Tabla 3.5: Normalización de las medidas de un criterio considerado costo y beneficio

Alternativa	Procedimiento 2 Costo				Procedimiento 2 Beneficio			
	Valores medidos		Valores normalizados		Valores medidos		Valores normalizados	
A1	34	$\frac{24}{34} = 0.7059$	$\frac{0.7059}{3.4519} = 0.2045$		34	$\frac{34}{34} = 1.000$	$\frac{1.0}{3.3235} = 0.3001$	
A2	27	$\frac{24}{27} = 0.8889$	$\frac{0.8889}{3.4519} = 0.2575$		27	$\frac{27}{34} = 0.7941$	$\frac{0.7941}{3.3235} = 0.2389$	
A3	24	$\frac{24}{24} = 1.000$	$\frac{1.000}{3.4519} = 0.2897$		24	$\frac{24}{34} = 0.7059$	$\frac{0.7059}{3.3235} = 0.2124$	
A4	28	$\frac{24}{28} = 0.8571$	$\frac{0.8571}{3.4519} = 0.2482$		28	$\frac{28}{34} = 0.8235$	$\frac{0.8235}{3.3235} = 0.2477$	
	<b>24<sup>†</sup></b>	<b>3.4519</b>	<b>1.0</b>		<b>34<sup>‡</sup></b>	<b>3.3235</b>	<b>1.0</b>	

† Se toma el mínimo valor de la columna; ‡ Se toma el máximo valor de la columna.

Observemos que si las medidas se asociaran con un criterio considerado beneficio, el procedimiento 2 tendría que utilizar la ecuación 3.2 mientras que el procedimiento 1 se aplicaría permanecería sin cambios. En la Tabla 3.5 se aplica el procedimiento 2 considerando al criterio como costo y luego como beneficio. Notemos que si el criterio es un beneficio al aplicar el procedimiento 2, los valores normalizados son muy similares a los correspondientes al procedimiento 1.

En esta subsección hemos descrito el procedimiento para comparar criterios utilizado en [21], en donde la importancia relativa de los criterios con respecto al objetivo depende de las preferencias de las aplicaciones. Mientras que en la evaluación de las alternativas se comparan las magnitudes de los criterios medidas directamente de las redes. Así la evaluación *criterios-objetivo* es cualitativa mientras que la relación *alternativas-criterios* es cuantitativa como se muestra en la Figura 3.2.

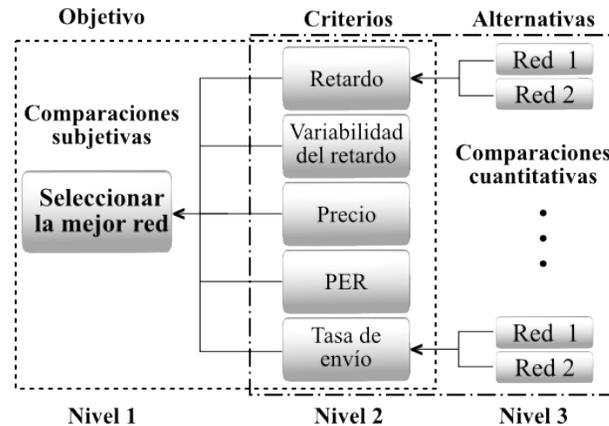


Figura 3.2: Comparación de los elementos de decisión en los niveles de la jerarquía

### 3.1.3. Síntesis de prioridades locales y globales

La información reunida en el proceso de comparación descrito en la subsección anterior permite obtener índices de prioridad, denominados *pesos relativos*, asociados a los elementos en el árbol de decisión.

Si se conocen los pesos relativos de los  $n$  elementos en un nivel de la jerarquía, con respecto al nivel superior inmediato, la matriz de comparaciones por pares está dada por

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} \omega_1/\omega_1 & \cdots & \omega_1/\omega_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_n/\omega_1 & \cdots & \omega_n/\omega_n \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

En este caso los pesos relativos podrían ser obtenidos de cada uno de los renglones de la matriz  $\mathbf{\Omega}$ . En otras palabras, la matriz  $\mathbf{\Omega}$  tiene *rango* 1 [29], por lo que se cumple que

$$\mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{w} = n \cdot \mathbf{w} \quad (3.5)$$

donde  $\mathbf{w} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$  es el vector de pesos relativos de los  $n$  elementos. Notemos que el vector  $\mathbf{w}$  y  $n$  en la ecuación 3.5 son llamados el vector propio y el valor propio de la matriz  $\mathbf{\Omega}$ .

El método AHP supone que durante el proceso de decisión el vector de pesos  $\mathbf{w}$  es desconocido por lo que debe ser obtenido como un paso posterior al establecimiento de prioridades descrito en la subsección anterior.

Si la comparación de criterios es de carácter cuantitativo, el vector de valores normalizados es también el vector de pesos  $\mathbf{w}$ . En la Tabla 3.6 se muestra un ejemplo en el que las mediciones obtenidas de dos redes se utilizan para obtener los pesos relativos de éstas con respecto a los criterios. Cada criterio tiene dos mediciones, una por cada alternativa. En consecuencia cada criterio también tiene un vector de pesos relativos con dos elementos.

Tabla 3.6: Vectores de medidas correspondientes a dos redes alternativas

		Criterios			
		Retardo (ms)	Variabilidad del retardo ( $\mu$ s)	PER	Tasa de envío (Mbps)
<b>Mediciones de las alternativas</b>	Red 1	10	35	0.03	0.7
	Red 2	22	18	0.01	2.3
<b>Valores normalizados</b>	Red 1	0.6875	0.3396	0.25	0.2333
	Red 2	0.3125	0.6604	0.75	0.7667

Si las comparaciones son cualitativas, las matrices de comparación por pares deben ser construidas para obtener el vector de pesos a través de alguno de los siguientes métodos:

**Vectores propios.** Éste es el procedimiento original para sintetizar las prioridades. Consiste en obtener el vector propio asociado al *mayor* valor propio de la matriz de comparación por pares.

**Medias geométricas.** Este es un método aproximado cuyos resultados generalmente son similares a los obtenidos a través del método anterior. Consiste en resolver las matrices de comparación tomando las medias geométricas sobre cada fila para después normalizarlo con respecto a la suma de sus elementos.

En [21], aplicando el método de medias geométricas a las matrices en la Tabla 3.3, se han obtenido los vectores de pesos mostrados en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Vectores de peso de los criterios respecto a las clases de servicio

Perfil	Criterios				$\sum_{i=1}^4 C_i$
	C1	C2	C3	C4	
Conversacional	0.4375	0.4375	0.0625	0.0625	1.0
Interactivo	0.1428	0.4016	0.0540	0.4016	1.0
Streaming	0.1605	0.0430	0.6559	0.1605	1.0

C1: retardo, C2: variabilidad del retardo, C3: PER, C4: tasa de envío

El conocimiento de los pesos relativos en cada nivel de la jerarquía, permite derivar un vector de pesos compuestos relativos que proporciona una clasificación de los elementos en cierto nivel de la jerarquía respecto al nivel más alto en la misma, es decir, respecto al objetivo.

El vector de pesos compuestos de los elementos en el  $k$ -ésimo nivel de la jerarquía respecto al primer nivel está dado por

$$\mathbf{P}_k = \prod_{i=k}^2 \mathbf{B}_i \quad (3.6)$$

donde  $\mathbf{P}_k$  es el vector de pesos compuesto del nivel  $k$  respecto al único elemento en el nivel 1, el objetivo, y  $\mathbf{B}_i$  es la matriz de  $n_{i-1} \times n_i$  cuyos renglones son vectores  $\mathbf{w}$ . El valor  $n_i$  representa el número de elementos en el  $i$ -ésimo nivel.

En la Figura 3.3 se muestra el árbol de decisión con los pesos relativos obtenidos para cada elemento considerando que el objetivo es seleccionar la mejor red para una clase de servicio conversacional. Los pesos relativos de las alternativas son los mismos que hemos calculado para el ejemplo de la Tabla 3.6.

Aplicando la ecuación 3.6, podemos encontrar los pesos de las alternativas respecto al objetivo en [21], en el que  $k = 3$ .

$$\mathbf{P}_3 = \prod_{i=3}^2 \mathbf{B}_i = \mathbf{B}_3 \cdot \mathbf{B}_2 \quad (3.7)$$

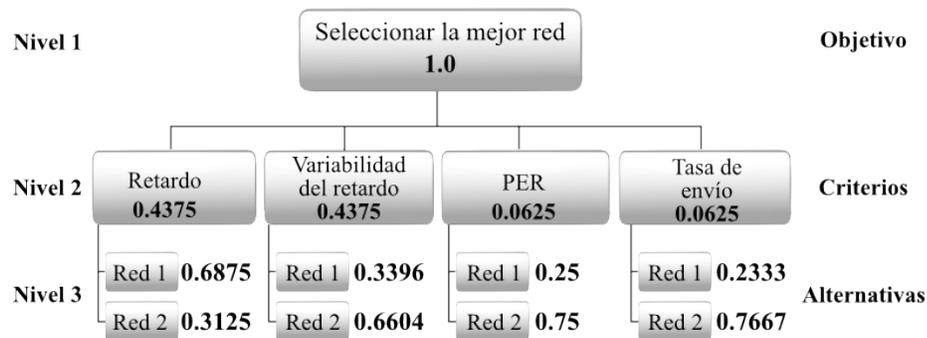


Figura 3.3: Comparación de los elementos de decisión en los niveles de la jerarquía

así

$$\mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} 0.6875 & 0.3396 & 0.25 & 0.2333 \\ 0.3125 & 0.6604 & 0.75 & 0.7667 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.4375 \\ 0.4375 \\ 0.0625 \\ 0.0625 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Así, al realizar la operación indicada por 3.8 tenemos que

$$\mathbf{P}_3 = \begin{bmatrix} 0.4795 \\ 0.5204 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

En conclusión el vector  $\mathbf{P}_3$  indica que de las dos alternativas en el nivel 3 de la jerarquía, la segunda opción es la mejor de acuerdo a las preferencias de una aplicación tipo conversacional.

### 3.1.4. Acuerdo entre aplicaciones

El problema resuelto en [21] considera dos sesiones de comunicación activas en un dispositivo móvil, una de voz y una de video. Así, ambas sesiones deben llegar a un acuerdo para seleccionar la red que mejor se ajuste a sus preferencias. Las clases de servicio asociadas con las sesiones son de tipo conversacional para la voz y de tipo streaming para el video. Las matrices de comparación para estas clases de servicio se muestran en la Tabla 3.8

Tabla 3.8: Matrices de comparación para las aplicaciones de voz y video

Conversacional						Streaming					
Criterio	Criterio					Criterio	Criterio				
	C1	C2	C3	C4	C5		C1	C2	C3	C4	C5
<b>C1</b>	1/1	7/1	1/1	7/1	1/1	<b>C1</b>	1/1	1/1	3/1	7/1	1/1
<b>C2</b>		1/1	1/7	1/1	1/7	<b>C2</b>		1/1	3/1	7/1	1/1
<b>C3</b>			1/1	7/1	1/1	<b>C3</b>			1/1	3/1	1/3
<b>C4</b>				1/1	1/7	<b>C4</b>				1/1	1/7
<b>C5</b>					1/1	<b>C5</b>					1/1

C1: precio, C2: tasa de envío, C3: retardo, C4: PER, C5: variabilidad del retardo

Cada matriz se ha construido para expresar las preferencias individuales de la correspondiente clase de servicio. En [21] se propone un procedimiento para incluir simultáneamente las preferencias de dos clases de servicio distintas definiendo una matriz de intervalos, como se muestra en la Tabla 3.9. Observemos cómo se han definido en la tabla los intervalos del triángulo inferior a partir de los intervalos en el triángulo superior.

Tabla 3.9: Intervalos de comparación para las aplicaciones de voz y video

Conversacional-Streaming					
Criterio	Criterio				
	C1	C2	C3	C4	C5
<b>C1</b>	$[\frac{1}{1}, \frac{1}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{7}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{3}{1}]$	$[\frac{7}{1}, \frac{7}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{1}{1}]$
<b>C2</b>	$[\frac{1}{7}, \frac{1}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{1}{1}]$	$[\frac{1}{7}, \frac{3}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{7}{1}]$	$[\frac{1}{7}, \frac{1}{1}]$
<b>C3</b>	$[\frac{1}{3}, \frac{1}{1}]$	$[\frac{1}{3}, \frac{7}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{1}{1}]$	$[\frac{3}{1}, \frac{7}{1}]$	$[\frac{1}{3}, \frac{1}{1}]$
<b>C4</b>	$[\frac{1}{7}, \frac{1}{7}]$	$[\frac{1}{7}, \frac{1}{1}]$	$[\frac{1}{7}, \frac{1}{3}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{1}{1}]$	$[\frac{1}{7}, \frac{1}{7}]$
<b>C5</b>	$[\frac{1}{1}, \frac{1}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{7}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{3}{1}]$	$[\frac{7}{1}, \frac{7}{1}]$	$[\frac{1}{1}, \frac{1}{1}]$

C1:precio, C2:tasa de envío, C3:retardo, C4:PER, C5:variabilidad del retardo

Para obtener el vector de prioridad de la matriz de intervalos primero se calcula la media geométrica  $\sqrt{l_{ij} \cdot u_{ij}}$  para cada intervalo, donde  $l_{ij}$  y  $u_{ij}$  son los límites inferior y superior de cada intervalo respectivamente. Así la matriz de intervalos se convierte en la matriz mostrada en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10: Matriz de comparación conjunta para las aplicaciones de voz y video

Conversacional-Streaming					
Criterio	Criterio				
	C1	C2	C3	C4	C5
<b>C1</b>	1.0	2.64	1.17	7.0	1.0
<b>C2</b>	0.37	1.0	0.65	2.64	0.37
<b>C3</b>	0.57	1.52	1.0	4.0	0.57
<b>C4</b>	0.14	0.37	0.24	1.0	0.14
<b>C5</b>	1.0	2.64	1.73	7.0	1.0

C1:precio, C2:tasa de envío, C3:retardo, C4:PER, C5:variabilidad del retardo

El mismo procedimiento descrito hasta este punto se aplica para obtener las matrices que consideran simultáneamente las preferencias de dos y tres clases de servicio.

Los vectores de pesos obtenidos de las matrices conjuntas a través del método de medias geométricas se resumen en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Vectores pesos relativos para las clases de servicio

Clase de servicio	Pesos de los criterios				
	C1	C2	C3	C4	C5
<b>CoS<sub>1</sub></b>	0.3043	0.0435	0.3043	0.0435	0.3043
<b>CoS<sub>3</sub></b>	0.2774	0.1199	0.1199	0.4456	0.0372
<b>CoS<sub>2</sub></b>	0.2867	0.2867	0.1008	0.0390	0.2867
<b>CoS<sub>1</sub> &amp; CoS<sub>2</sub></b>	0.3663	0.0910	0.2408	0.1692	0.1327
<b>CoS<sub>1</sub> &amp; CoS<sub>3</sub></b>	0.3216	0.1215	0.1905	0.0448	0.3216
<b>CoS<sub>2</sub> &amp; CoS<sub>3</sub></b>	0.3497	0.2296	0.1355	0.1589	0.1263
<b>CoS<sub>1</sub> &amp; CoS<sub>2</sub> &amp; CoS<sub>3</sub></b>	0.3166	0.1655	0.1576	0.0438	0.3166

C1:precio, C2:tasa de envío, C3:retardo, C4:PER, C5:variabilidad del retardo  
CoS<sub>1</sub>:conversacional, CoS<sub>2</sub>:interactivo, CoS<sub>3</sub>:streaming

Para finalizar el análisis de la propuesta en [21], en la Figura 3.4 se muestran los vectores de pesos, de la Tabla 3.11, representados con histogramas.

En la Figura 3.4a podemos observar las diferencias entre los tres perfiles de selección básicos, es decir, los correspondientes a las clases de servicio conversacional, interactiva y *streaming*. Los pesos asignados a cada criterio, como resultado del acuerdo entre dos clases de servicio, se muestran en los histogramas de la Figura 3.4b.

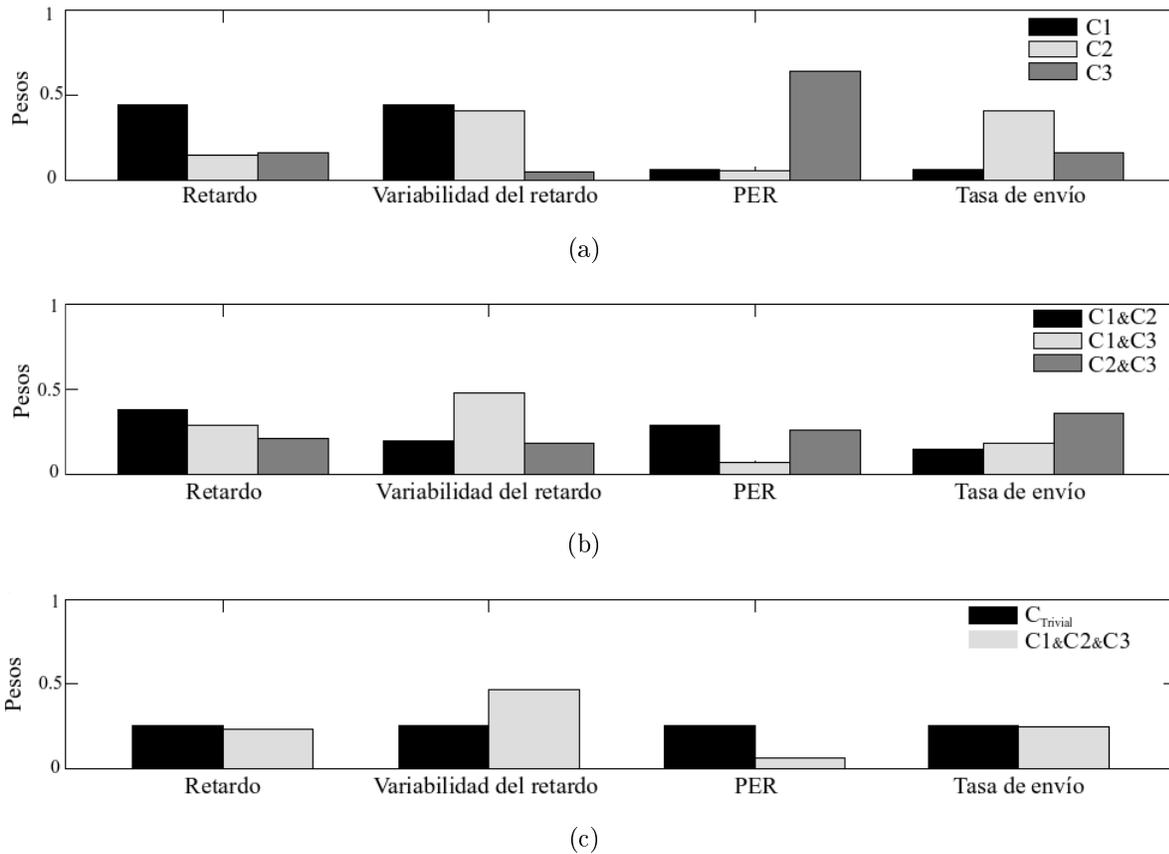


Figura 3.4: Histogramas de los vectores de prioridad para los perfiles de selección  
C1: CoS conversacional, C2: CoS interactiva, C3: streaming

Al considerar las tres clases de servicio y combinar sus preferencias surgen los pesos mostrados en la Figura 3.4c, donde además se incluye un perfil de selección considerado *trivial*. En general, el perfil trivial equivale a distribuir equitativamente los pesos entre  $n$  criterios de decisión.

# Requerimientos de QoS en el método AHP

---

Hasta este punto, se ha descrito el proceso de *handoff* vertical y el papel que juega en las redes de siguiente generación. Se ha dicho que es fundamental un mecanismo eficiente de *decisión* para este proceso. Además, se ha realizado un análisis del algoritmo de decisión basado en AHP, propuesto en [21]. Este análisis brinda un marco de referencia útil para presentar las modificaciones que representan nuestra propuesta.

## 4.1. Estructura jerárquica de decisión

La primera modificación propuesta se realiza directamente sobre el árbol de decisión de la Figura 3.1. Como se ha mencionado en la sección 3.1.2, en [21] se asume que las ponderaciones de los criterios de decisión dependen de las clases de servicio. Es decir, las CoS forman parte del conjunto de los elementos involucrados en la selección de la mejor red. Por esta razón las CoS deben incluirse explícitamente en la jerarquía, agregándose en un nuevo nivel.

En la Figura 4.1 se muestra la estructura jerárquica que incluye los principales elementos en la decisión de *handoff*.

Al incluir las CoS como elementos de decisión, podemos establecer órdenes de prioridad entre éstas. Para mostrar el beneficio de esta modificación, supóngase un escenario en el que un usuario requiere mantener activas tres aplicaciones. Cada una de las aplicaciones está asociada a una clase de servicio diferente (interactiva, conversacional o streaming). Además, puede ocurrir que en algún momento el desempeño de una o varias aplicaciones deba ser optimizado. De esta manera, las aplicaciones que en ciertos momentos pueden ser más importantes para el usuario deberían tener mayor prioridad o mayor peso en la selección de la mejor red. En el ejemplo anterior se asume que las tres aplicaciones están activas. En general, la inclusión de una aplicación en la toma de decisión depende del estado activo o inactivo de la misma.

El modelo jerárquico de decisión propuesto incluye una considerable ventaja con respecto al original. Ésta permite establecer relaciones de prioridad entre las CoS adaptándose a las necesidades o preferencias de los usuarios. Esta propiedad del algoritmo de decisión podría ser utilizado para optimizar el desempeño de aplicaciones en tiempo real.

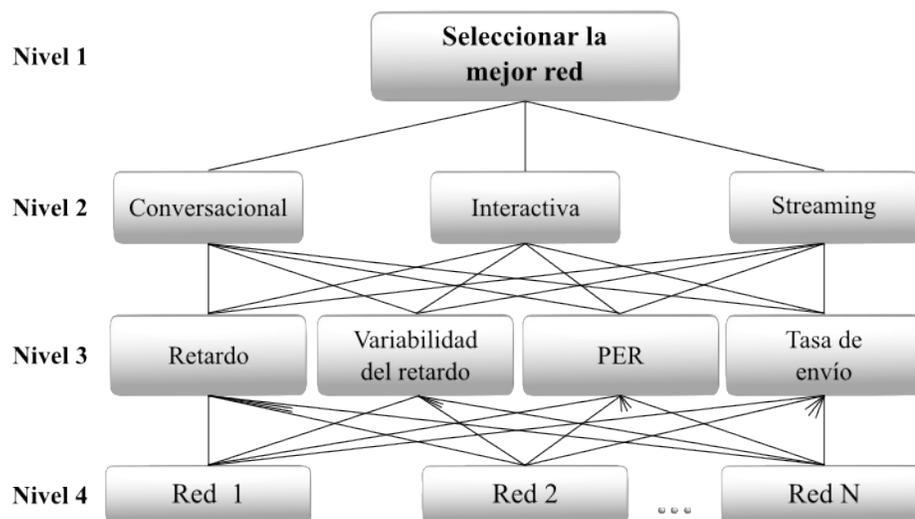


Figura 4.1: Árbol de decisión propuesto para el handoff vertical

## 4.2. Requerimientos mínimos en el método AHP

En la sección 3.1 se ha descrito detalladamente cómo es que en [21] se ha aplicado el método AHP. Las principales etapas en la aplicación del método son:

1. Identificar los elementos de decisión involucrados en la resolución de un problema.
2. Colectar información acerca de los elementos de decisión.
3. Estructurar jerárquicamente los elementos de decisión estableciendo relaciones de dependencia.
4. Comparar el grado de importancia de los elementos en cada nivel del árbol respecto a cada elemento del nivel superior inmediato.
5. Representar en matrices las relaciones de importancia.
6. Sintetizar vectores de prioridad locales y finalmente el vector de prioridad global.

La principal virtud del método AHP es su capacidad de combinar en un proceso de decisión, aspectos cuantitativos y cualitativos. Por esta razón, la relación subjetiva que se ha establecido en [21] entre las aplicaciones y los parámetros en el paso 4, puede sustituirse por una relación definida a partir de los requerimientos mínimos de QoS descritos en el capítulo 1.

Así, la segunda modificación realizada utiliza los requerimientos mínimos de QoS descritos en el capítulo 1, en el proceso de *normalización de medidas* del paso 4. Los requerimientos de QoS, sustituyen la forma subjetiva de relacionar los parámetros con las clases de servicio.

Las redes son evaluadas de acuerdo a cuatro criterios: retardo, variabilidad del retardo, PER y tasa de envío, como se observa en la Figura 4.1. Así, las magnitudes de estos

parámetros asociados a cada red alternativa, deben ser comparadas como parte del método AHP.

El proceso de normalización propuesto, consiste en comparar las medidas de los parámetros de las redes alternativas contra los requerimientos de QoS de las aplicaciones activas.

Como se dijo en la sección 3.1.2, la normalización de los criterios considerados beneficios está dada por la ecuación 4.1

$$r_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\hat{x}_i} \quad ; i \in 1, \dots, m_b, \quad j \in 1, \dots, n \quad (4.1)$$

donde  $r_{i,j}$  es el valor normalizado del atributo  $x_{i,j}$ ;  $\hat{x}_i$  es el máximo valor del  $i$ -ésimo vector fila de la matriz  $\mathbf{X}_{m_b \times n}$ ,

Así mismo, la normalización para los costos está dada por la ecuación 4.2

$$r_{i,j} = \frac{\tilde{x}_i}{x_{i,j}} \quad ; i \in 1, \dots, m_c, \quad j \in 1, \dots, n \quad (4.2)$$

donde,  $\tilde{x}_i$  es el mínimo valor del  $i$ -ésimo vector columna en la matriz  $\mathbf{X}_{m_c \times n}$ .

En las ecuaciones anteriores los respectivos elementos  $\hat{x}_i$  y  $\tilde{x}_i$  son sustituidos por los umbrales de QoS de las aplicaciones que participan en la toma de decisión. Este sencillo proceso fija un umbral de QoS respecto del cual se comparan las distancias euclidianas de los parámetros de entrada.

### 4.2.1. Síntesis de prioridades

A través del método AHP se asocian pesos a las alternativas en competencia para identificar cuál es la mejor. El proceso para obtener estos índices se denomina *síntesis de prioridades*. Las prioridades son expresadas a través de vectores cuyas dimensiones dependen de si el vector es *local* o *global*. La cantidad de elementos en un mismo nivel de la jerarquía de decisión, determina el tamaño de un vector de prioridad local. Por otro lado, la cantidad de alternativas en el nivel inferior de la estructura jerárquica determina la dimensión del vector de prioridad global.

En el capítulo 3, se ha descrito que la asignación de ponderaciones es *subjetiva*. Las clases de servicio, individualmente asignan pesos a los parámetros o criterios usando una escala de ponderación subjetiva. Así, el impacto que el retardo, variabilidad del retardo, PER y tasa de envío tienen en las clases de servicio se expresa de acuerdo a juicios subjetivos.

Sin embargo, cada aplicación está intrínsecamente asociada con requerimientos mínimos de QoS de acuerdo a su naturaleza. La inclusión de estos requerimientos en la toma de decisión constituye la principal modificación propuesta al esquema original. Así, la búsqueda de la mejor red se realiza en función de *umbrales mínimos* para retardo, variabilidad del retardo, PER y tasa de envío. Dichos umbrales pueden ser ajustados de acuerdo a las necesidades de cada clase de servicio.

Con esta simple modificación, las diferencias entre las aplicaciones quedan expresadas de manera *objetiva*, en contraste con la propuesta original, como se ilustra en la Figura 4.2.

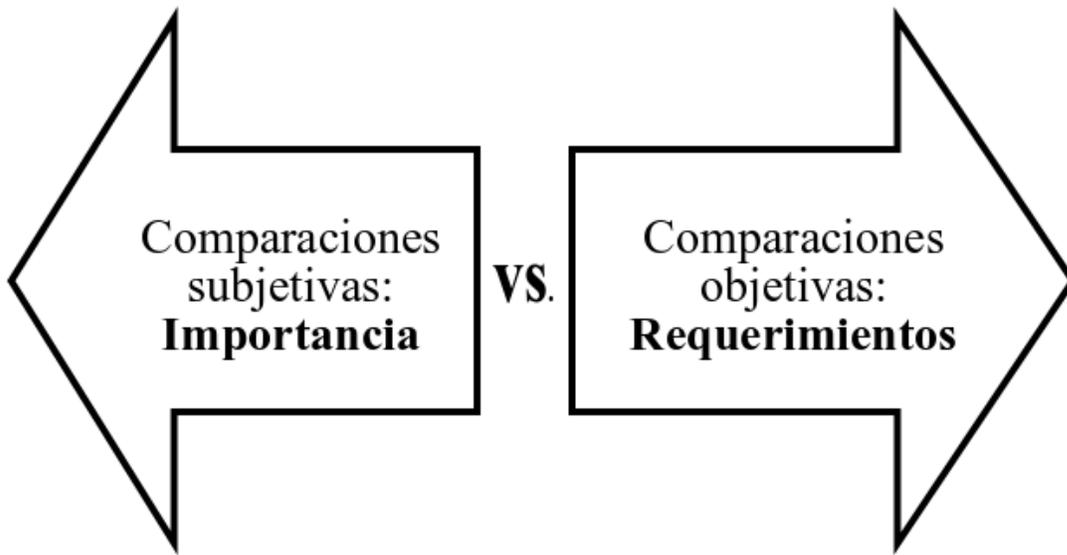


Figura 4.2: Enfoques para el establecimiento de relaciones entre clases de servicio

---

# Evaluación de desempeño: comparación de algoritmos

---

Hasta este punto se ha justificado la importancia de la toma de decisión en el proceso de *handoff* vertical. Además, se ha descrito el algoritmo propuesto en [21], así como las modificaciones que constituyen nuestra propuesta. En las siguientes secciones, el algoritmo propuesto en [21] será referido como *algoritmo 1*; mientras que nuestra propuesta de modificación será el *algoritmo 2*. En la sección 5.1, se discute la metodología de simulación y se describen las características del escenario de simulación. El análisis de los resultados obtenidos se incluye en la sección 5.2.

## 5.1. Metodología de simulación

A través de un enfoque de simulación numérica se ha establecido un marco de comparación para los algoritmos, considerando los siguientes aspectos:

- Medidas promedio de los valores seleccionados.
- Compromiso entre los parámetros o criterios de selección.
- Estabilidad al incrementar la cantidad de redes alternativas.
- Latencia promedio en la toma de decisión.

### 5.1.1. Escenario de simulación

Proponemos un escenario en el que un usuario está ubicado en una zona donde la cobertura de diferentes redes se traslapa y se dispone de la infraestructura del estándar 802.21. La Figura 5.1, ejemplifica la situación descrita.

Las tecnologías de red consideradas para la simulación se comparan en la Tabla 5.1. Es importante mencionar que no se pretende caracterizar o modelar dichas tecnologías ya que esto está fuera de los alcances de nuestra investigación. La cantidad de redes cuyas coberturas se traslapan y que en consecuencia son consideradas alternativas, varía entre dos y dieciséis.

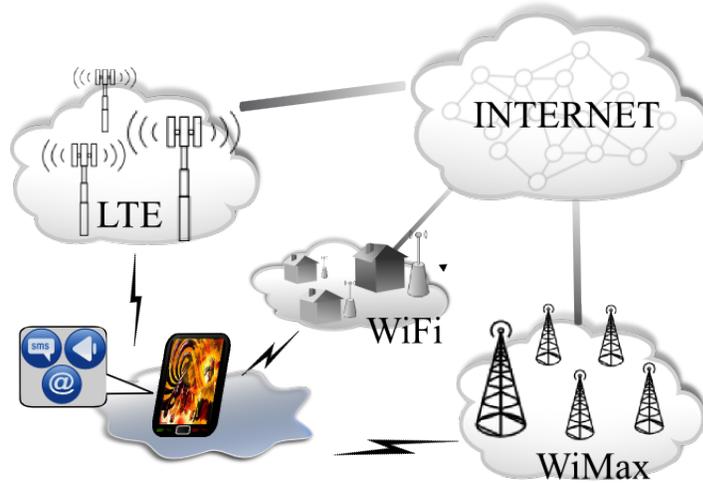


Figura 5.1: Escenario de simulación para la evaluación de los algoritmos

Un usuario tiene activas tres sesiones de comunicación en un dispositivo móvil y requiere realizar el proceso de *handoff*, ya sea por cuestiones de conectividad o por que así lo prefiere. El dispositivo móvil cuenta con interfaces de red correspondientes a diferentes tecnologías, también tiene implementadas las funcionalidades del estándar 802.21, por lo que puede obtener información acerca de las condiciones actuales en las redes vecinas. Basado en esta información puede aplicar los algoritmos 1 y 2 para seleccionar una red.

Los vectores de pesos relativos utilizados para ambos algoritmos durante el proceso de selección se muestran en la Tabla 5.2. El vector de pesos del algoritmo 1, considera el acuerdo entre las clases de servicio *conversacional*, *interactivo* y *streaming*. Este perfil es único, ya que como se ha descrito en el capítulo 3, surge de un análisis subjetivo entre las relaciones de los criterios y las clases de servicio.

Por otra parte, el algoritmo 2 nos permite definir y además priorizar las aplicaciones activas para ajustar el perfil de selección. Por ejemplo, el vector de pesos denominado *algoritmo 2a*, se obtiene al combinar los requerimientos de QoS de una aplicación de audio, tipo conversacional, y dos aplicaciones de video, una de tipo conversacional y otra de tipo streaming.

El perfil de selección denominado *algoritmo 2b*, incluye dos aplicaciones interactivas y una

Tabla 5.1: Características generales de las tecnologías inalámbricas consideradas en la simulación

Parámetro	Tecnologías inalámbricas		
	802.11 (WiFi)	802.16 (WiMAX)	3GPP-R8 (LTE)
Modulación	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 8PSK, 16QAM
Frecuencia	2.4 GHz	3.5GHz	800, 900, 1800, 1900 MHz
Ancho de Banda	20 MHz	10 MHz	1.25 MHz
Método de acceso	CSMA	OFDM/OFDMA	SC-FDMA, OFDM
Cobertura	30 m	5 km	<3 km

Tabla 5.2: Vectores de pesos relativos utilizados en la evaluación de los algoritmos

Perfil	Retardo	Variabilidad del retardo	PER	Tasa de envío
Algoritmo 1	0.3089	0.2788	0.1840	0.2284
Algoritmo 2a	0.6592	0.1420	0.1420	0.0568
Algoritmo 2b	0.3930	0.1847	0.1281	0.2893
Algoritmo 2c	0.0478	0.2597	0.1801	0.5124

de tipo conversacional. Finalmente el perfil nombrado *algoritmo 2c*, incluye una aplicación de video tipo conversacional, otra de datos interactivos y una tercera aplicación de video streaming.

### 5.1.2. Caracterización de los datos de entrada

Para evaluar y comparar el desempeño de los algoritmos 1 y 2, se realiza un experimento que consiste en obtener mediciones de los parámetros retardo, variabilidad del retardo, PER y tasa de envío para cada red alternativa. Un vector de cuatro mediciones se asocia a cada red, es decir, si se tienen cinco redes alternativas se tendrán también cinco vectores de mediciones. Los algoritmos utilizan sus correspondientes perfiles de selección para procesar el conjunto de mediciones y clasificar a las alternativas. Notemos que el experimento está diseñado para que ambos algoritmos clasifiquen al mismo tiempo los mismos conjuntos de mediciones, de este modo son evaluados bajo las mismas condiciones.

Representemos el vector de mediciones como un vector de variables aleatorias cuyos valores representan las mediciones de los parámetros o criterios

$$\mathbf{M}_r[i] = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{C}_2 \\ \mathbf{C}_3 \\ \mathbf{C}_4 \end{bmatrix} \quad ; i \in \{1, \dots, n\}, \quad ; r \in \{2, \dots, 16\} \quad (5.1)$$

donde  $\mathbf{M}_r[i]$  es el vector de variables aleatorias obtenido en la  $i$ -ésima realización de un total de  $n$  para  $r$  redes alternativas.  $\mathbf{C}_1$ ,  $\mathbf{C}_2$ ,  $\mathbf{C}_3$  y  $\mathbf{C}_4$  son las variables aleatorias correspondientes a los criterios retardo, variabilidad del retardo, PER y tasa de envío respectivamente. El rango de valores considerado para cada variable se muestra en la Tabla 5.3. La tasa de envío es una variable aleatoria discreta ya que el correspondiente espacio muestral es discreto, mientras que el resto de las variables son continuas.

Desde del punto de vista de los algoritmos de decisión el los elementos del vector  $\mathbf{M}_r[i]$  puede considerarse como una secuencia de variables aleatorias discretas ordenadas y no correlacionadas en tiempo.

El conocimiento *a priori* de las propiedades estadísticas de los parámetros incluidos en la decisión, es fundamental para brindar soporte al proceso de selección. No obstante, contar con este tipo de información en un escenario real resulta complejo.

Tabla 5.3: Rango de valores utilizados para cada parámetro

Parámetro	Rango de valores
Retardo [s]	(0, 0.5)
Variabilidad del retardo [ $\mu$ s]	(0, 200)
Tasa de envío <sup>†</sup> [Mbps]	[1, 27]
PER [%]	(0, 20)

<sup>†</sup> Los valores considerados en la simulación son 1, 4.5, 5, 7, 11, 18, 21, 24 y 27 Mbps

En la evaluación de los algoritmos se analiza el efecto de las distribuciones marginales de las variables aleatorias  $\mathbf{C}_i$ , en el desempeño de éstos. La hipótesis es que si existe una mayor dispersión en los datos procesados por los algoritmos su desempeño se verá degradado.

Para verificar la hipótesis planteada las simulaciones se realizan en dos partes. En la primera se utilizan distribuciones de probabilidad marginales uniformes, es decir  $\mathbf{C}_i \sim \mathbf{U}[l_i, u_i]$ , donde  $l_i$  y  $u_i$  representan los límites inferiores y superiores de los intervalos de la Tabla 5.3. En la segunda parte se utilizan distribuciones marginales propuestas en la literatura. La Figura 5.2, muestra los dos casos mencionados.

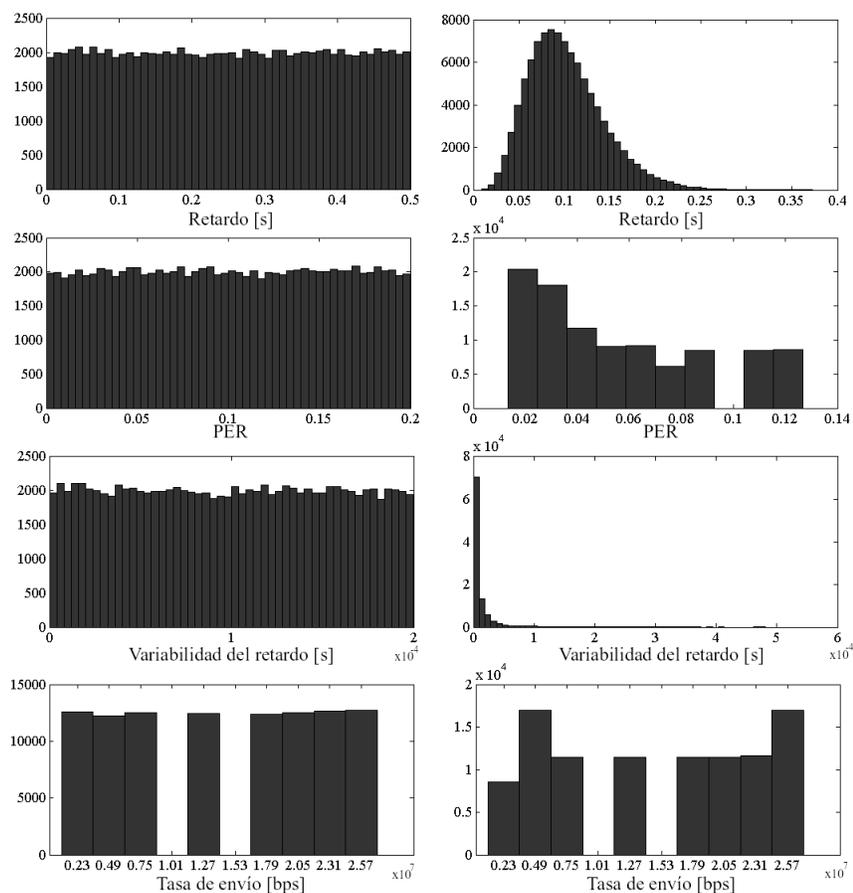


Figura 5.2: Distribuciones marginales de los parámetros de entrada para la evaluación de los algoritmos

La Figura 5.3, ilustra las secuencias de mediciones de los cuatro criterios obtenidas para  $N$  redes. Para los fines de la evaluación se asume que las  $i$ -ésimas mediciones se obtienen en al mismo tiempo. En la figura se muestra como en el instante  $i$  se obtienen  $N$  vectores de cuatro mediciones, una por cada criterio. En la simulación obtener una medida para un criterio significa muestrear variables aleatorias sujetas a ciertas distribuciones marginales.

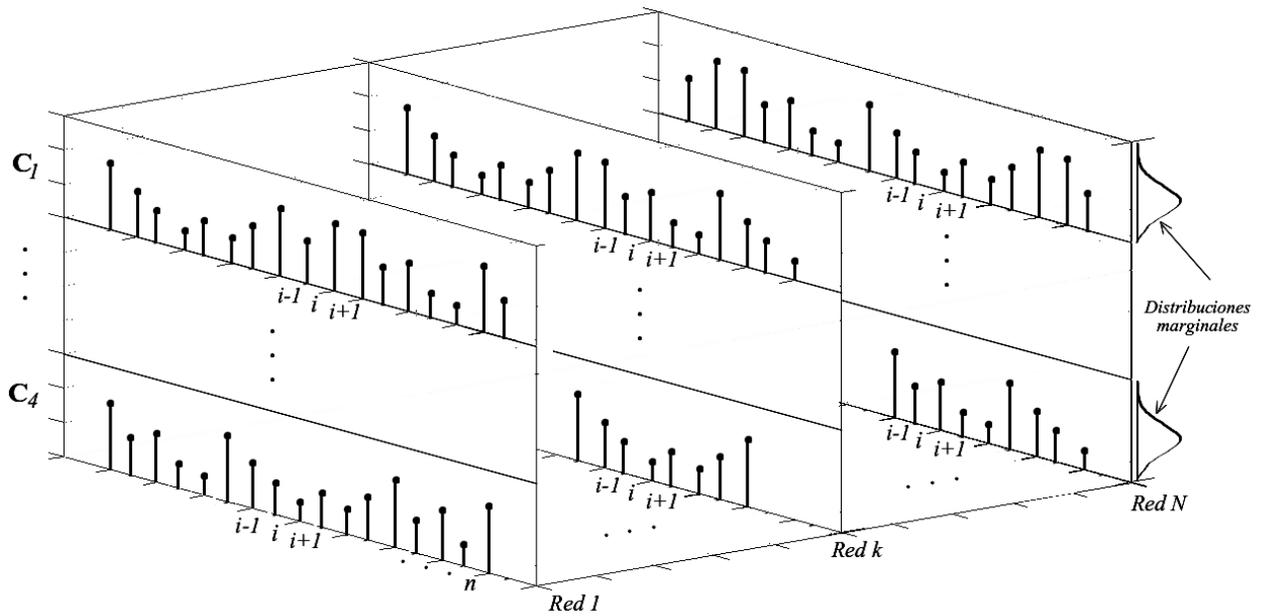


Figura 5.3: Variaciones de los parámetros de las redes alternativas durante el tiempo de simulación

## 5.2. Análisis y comparación de resultados

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de los algoritmos, obtenidos a través de simulaciones numéricas exhaustivas. Los resultados descritos en las siguientes subsecciones son válidos para los dos casos contemplados en la generación de los datos descritos en la sección 5.1.2.

### 5.2.1. Valores promedio y su clasificación

En capítulos anteriores, se han descrito las principales características del método AHP. La aplicación de este método, proporciona como resultado un *ranking* o clasificación de alternativas en competencia. En cada proceso de selección se establece un compromiso entre los parámetros utilizados como criterios de evaluación. Es decir, de los parámetros conjuntos asociados a cada alternativa, depende su clasificación dentro del ranking.

Así, los resultados de esta subsección se centran en el análisis de dos propiedades en las clasificaciones de la redes alternativas:

**Parámetros promedio seleccionados.** Durante el desarrollo de las simulaciones, ambos algoritmos realizaron más de 100,000 decisiones. En cada decisión clasificaron los mismos conjuntos de redes en función de sus correspondientes parámetros colectivos. Por esta razón, resulta natural analizar los valores promedio asociados a las redes clasificadas como las mejores y peores. Esta medida es útil para analizar el compromiso entre los cuatro parámetros usados como criterios.

**Consistencia en el ranking.** En un escenario real, una mayor cantidad y diversidad de alternativas debería ser aprovechada. Por lo tanto, se considera relevante evaluar el desempeño de los algoritmos al incrementar el número de redes alternativas. El ranking de alternativas identifica la mejor red, pero además permite conocer qué redes podrían ser buenas alternativas *secundarias*. Contar con una segunda, e incluso una tercera opción, podría representar una importante y práctica ventaja.

Las gráficas de la Figura 5.4 muestran los valores promedio de los parámetros y cómo han sido clasificados de acuerdo a los perfiles de selección. Las barras de error representan los intervalos de confianza determinados a un 95%. Las variaciones en las magnitudes de los intervalos de confianza alrededor de la media proporcionan una idea del grado de selectividad de cada perfil. Para brindar un mayor soporte a estos resultados en cada gráfica se incluye el intervalo que contiene, con un 95% de probabilidad, al coeficiente de correlación entre los valores promedio de los parámetros y su clasificación. Este intervalo *icc* (intervalo de confianza del coeficiente de correlación) se ha calculado utilizando el método *bootstrap*. Observemos que los valores promedio de los parámetros considerados *costos*, son monótonamente crecientes con respecto al ranking. Sólo la tasa de envío, considerada beneficio, es monótonamente decreciente en sus valores promedio. En cada gráfica de la Figura 5.4, se ha incluido una línea de ajuste por mínimos cuadrados (línea punteada). Esta línea muestra que la relación entre los valores promedio y su respectiva clasificación no es lineal.

---

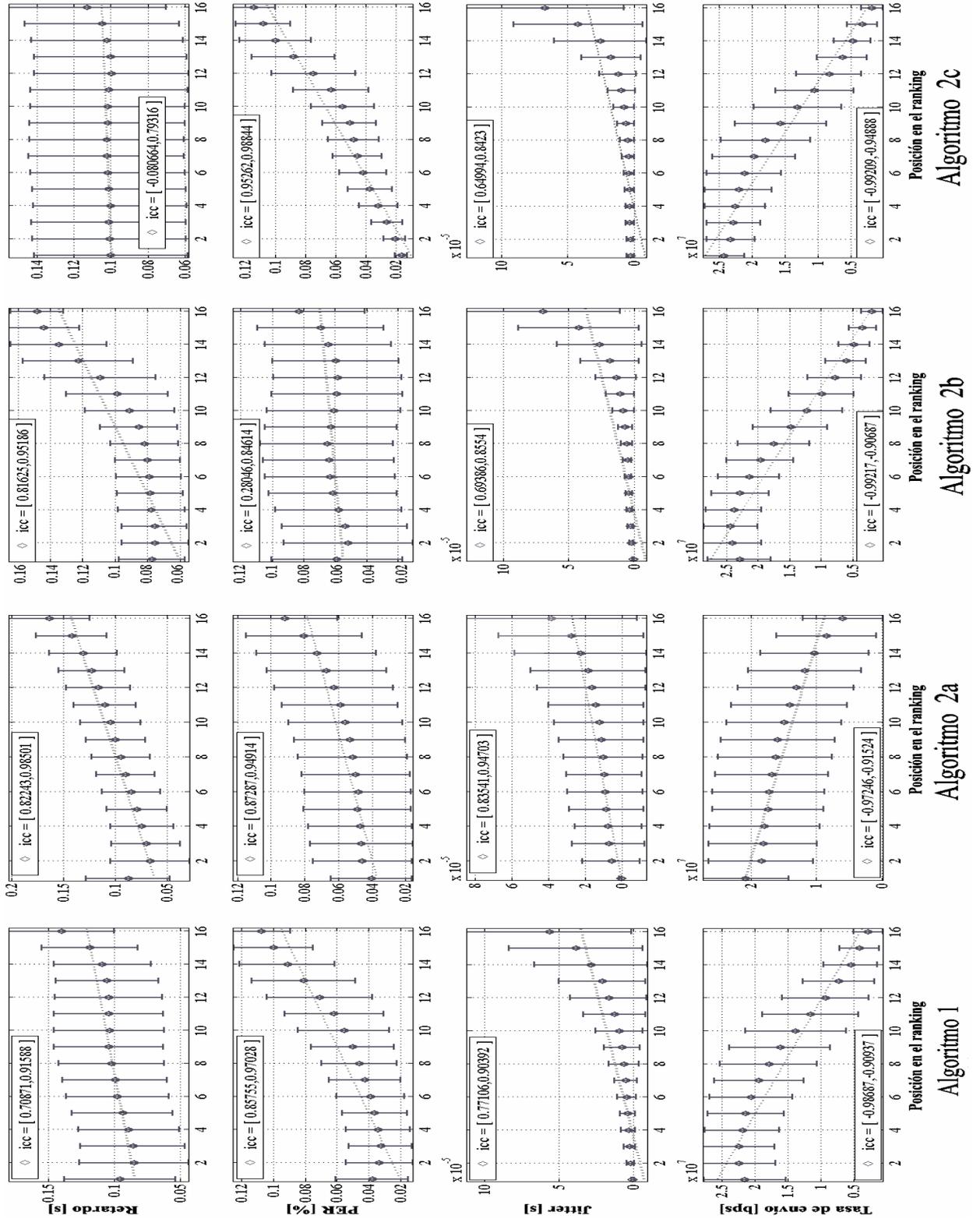


Figura 5.4: Parámetros promedio seleccionados vs posición en el ranking

Para observar la eficiencia y la consistencia de los algoritmos, las gráficas de la Figura 5.5, muestran los valores promedio de los parámetros retardo, variabilidad del retardo, PER y tasa de envío de las redes clasificadas como las *mejores tres* opciones. En esta figura, cada columna compuesta por cuatro gráficas, pertenece a un perfil de selección.

En la gráfica de cada uno de los parámetros, podemos observar agrupaciones de tres barras. Cada barra está asociada a una de las tres primeras posiciones del ranking generado por los correspondientes algoritmos. Así, cada grupo de tres barras muestra la relación entre los valores promedio de cada parámetro para los tres primeros lugares.

Estos histogramas exhiben la tendencia general de los algoritmos a optimizar cuando la cantidad de redes alternativas es mayor. Por ejemplo, en la gráfica de retardo correspondiente al algoritmo 2a, vemos que el retardo promedio seleccionado cuando se tienen 16 alternativas es aproximadamente 25 % menor que el retardo promedio cuando sólo se tienen 2 alternativas. En contraste con este resultado los histogramas de retardo para el algoritmo 2c se mantienen prácticamente invariantes ante el aumento en el número de alternativas. Esto se debe a que la ponderación del retardo para este perfil es mínima, como se muestra en la Tabla 3.11. Las tendencias en las gráficas se mantienen aun al cambiar las distribuciones utilizadas para generar las series de tiempo.

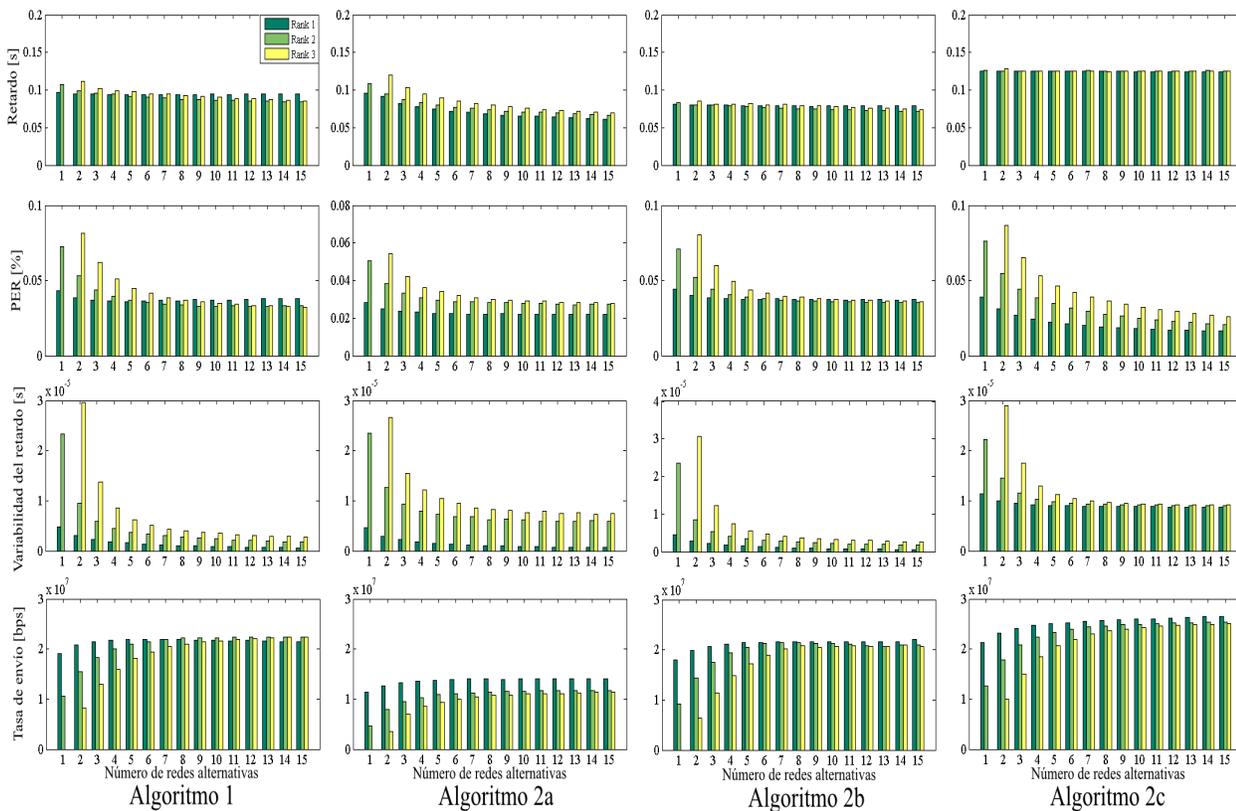


Figura 5.5: Parámetros promedio de las tres mejores redes seleccionadas al incrementar la cantidad de alternativas

Para concluir esta subsección, en las gráficas de la Figura 5.6, se comparan los valores promedio de los parámetros *tasa de envío* y *retardo* que han sido seleccionados por el Algoritmo 1 y por el Algoritmo 2b. En estas gráficas, de nueva cuenta observamos el desempeño de ambos algoritmos al aumentar las redes alternativas. Sin embargo, estos resultados sólo son válidos cuando existe cierto grado de correlación entre los parámetros. En las tres gráficas de ambas columnas, el rótulo *Algoritmo 1-1*, se refiere a los valores clasificados en primer lugar por el Algoritmo 1. Por otro lado, el rótulo *Algoritmo 1-2*, se refiere a los valores promedio seleccionados en segundo lugar por el mismo algoritmo. Análogamente, los rótulos para el Algoritmo 2, utilizan la misma notación.

En las gráficas inferiores de cada columna se han superpuesto las gráficas de los valores promedio para primeros y segundos lugares de cada algoritmo. Observemos que las gráficas *Algoritmo 1-1* y *Algoritmo 1-2*, se cruzan en cierto punto. Este resultado muestra que el Algoritmo 1 deja de ser consistente en la clasificación de más de 6 alternativas. Decimos que el algoritmo no es consistente cuando las alternativas clasificadas en los primeros lugares no son precisamente las mejores. Esta situación puede ser resultado del establecimiento de un compromiso entre parámetros o bien, puede deberse a las propiedades inherentes al método AHP. En [20], se menciona que AHP es consistente mientras la cantidad de alternativas sea menor a nueve.

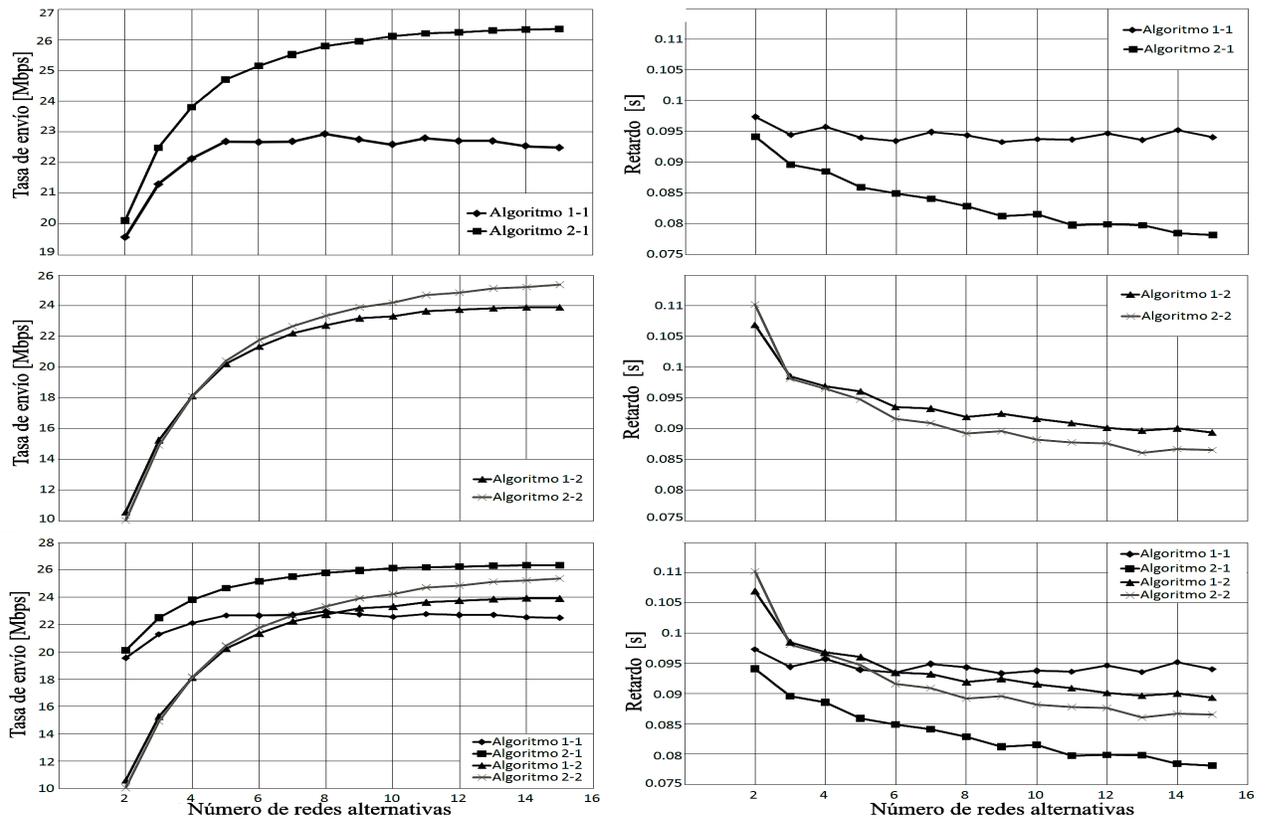


Figura 5.6: Consistencia en la clasificación de parámetros al aumentar las redes alternativas

## 5.2.2. Correlación entre los parámetros

Las gráficas de la Figura 5.7, muestran las relaciones entre los parámetros de las redes clasificadas. Cada columna de seis gráficas incluye todas las combinaciones posibles de los criterios de selección. Además, en cada gráfica se ha incluido una línea de ajuste por mínimos cuadrados como referencia. Al graficar los promedios de un parámetro  $i$ , contra los promedios de un parámetro  $j$ , podemos tener una idea del compromiso entre éstos. Por ejemplo, observemos la gráfica para el factor *Retardo-Tasa de envío*. Este factor de relación en la columna de la izquierda muestra que las redes clasificada en las primeras posiciones, tienen un retardo promedio entre 80 y 100 ms y una tasa de envío superior a los 20 Mbps. La gráfica del mismo factor pero del Algoritmo 2a, indica que las redes seleccionadas en los primeros lugares, tienen en promedio un retardo entre 60 y 70 ms, y una tasa de envío menor a los 20 Mbps.

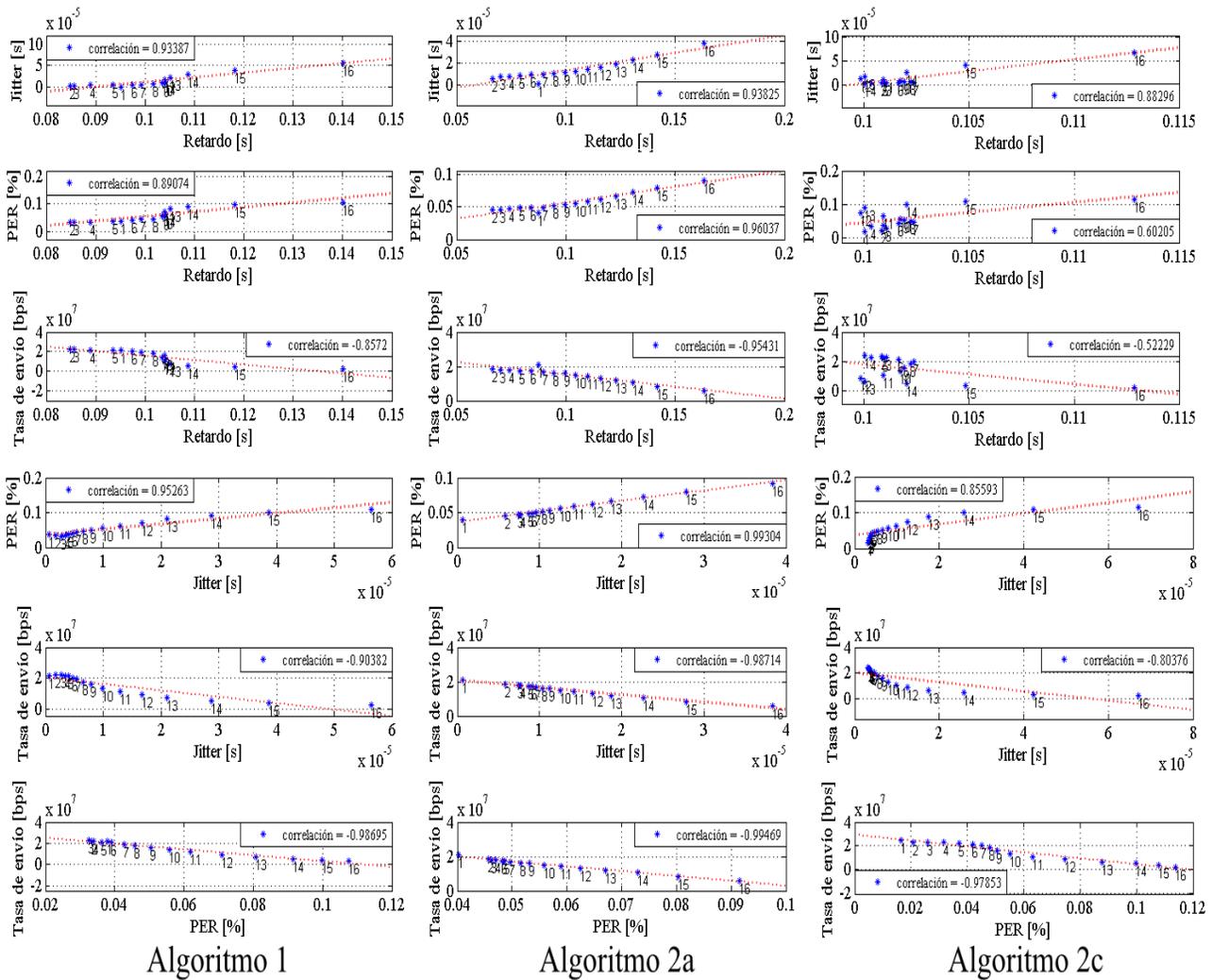


Figura 5.7: Coeficiente de correlación entre pares de parámetros y su clasificación

Notemos que las relaciones entre parámetros *costo-costo* están positivamente correlacionadas, mientras que las relaciones *costo-beneficio* tienen una correlación negativa. Los algoritmos clasifican como mejores alternativas, aquellas cuyos parámetros se encuentran en regiones donde los costos son mínimos y los beneficios son máximos.

Aunque las gráficas resultan intuitivas, no proporcionan ninguna medida cuantitativa útil. Entonces, se incluyen los coeficientes de correlación entre los parámetros, para contar con un número que describa las relaciones entre los valores mostrados. Esta cantidad nos proporciona cierta noción numérica, pero no sabemos si es estadísticamente significativa. Usando el proceso *bootstrap* podemos reutilizar las series de datos y considerar las variaciones entre los coeficientes de correlación resultantes. Los histogramas en la Figura 5.8, y los intervalos de confianza a un 95% incluidos en las gráficas, brindan un soporte estadístico al coeficiente de correlación antes encontrado. Este análisis ofrece una fuerte evidencia cuantitativa de la correlación positiva o negativa existente entre parámetros.

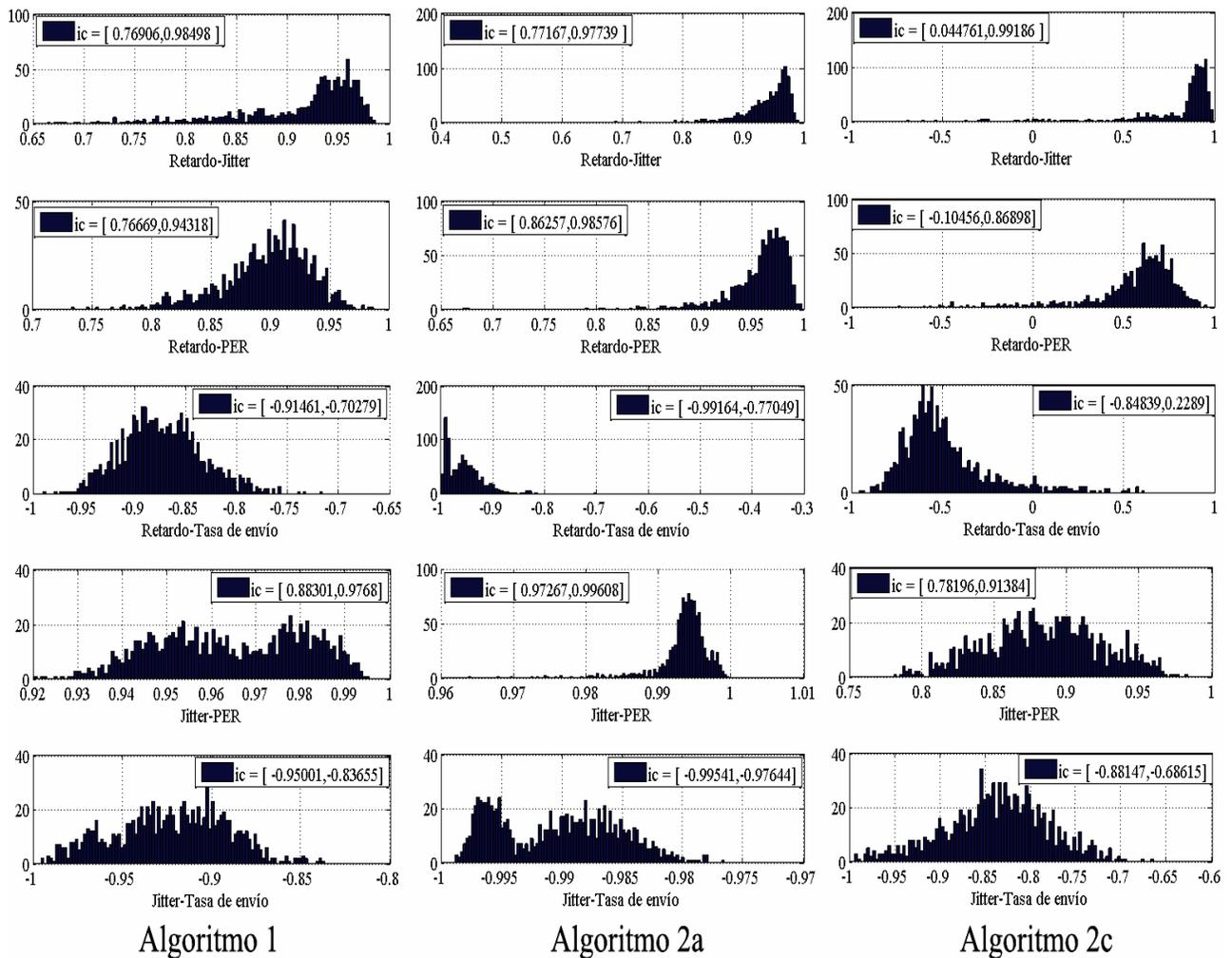


Figura 5.8: Intervalos de confianza para la correlación entre los parámetros

Las gráficas de la Figura 5.9 son una herramienta más para observar el comportamiento variacional entre los parámetros. En éstas observamos cómo es que un parámetro varía con respecto a otro. Los parámetros cuyos valores están más concentrados alrededor del cero, indican que el grado de selectividad de un perfil es mayor con respecto a esos parámetros. Por otro lado aquellos que presentan una mayor dispersión han sido seleccionados con un menor grado de selectividad. La selectividad este en función de los pesos relativos los criterios en cada perfil.

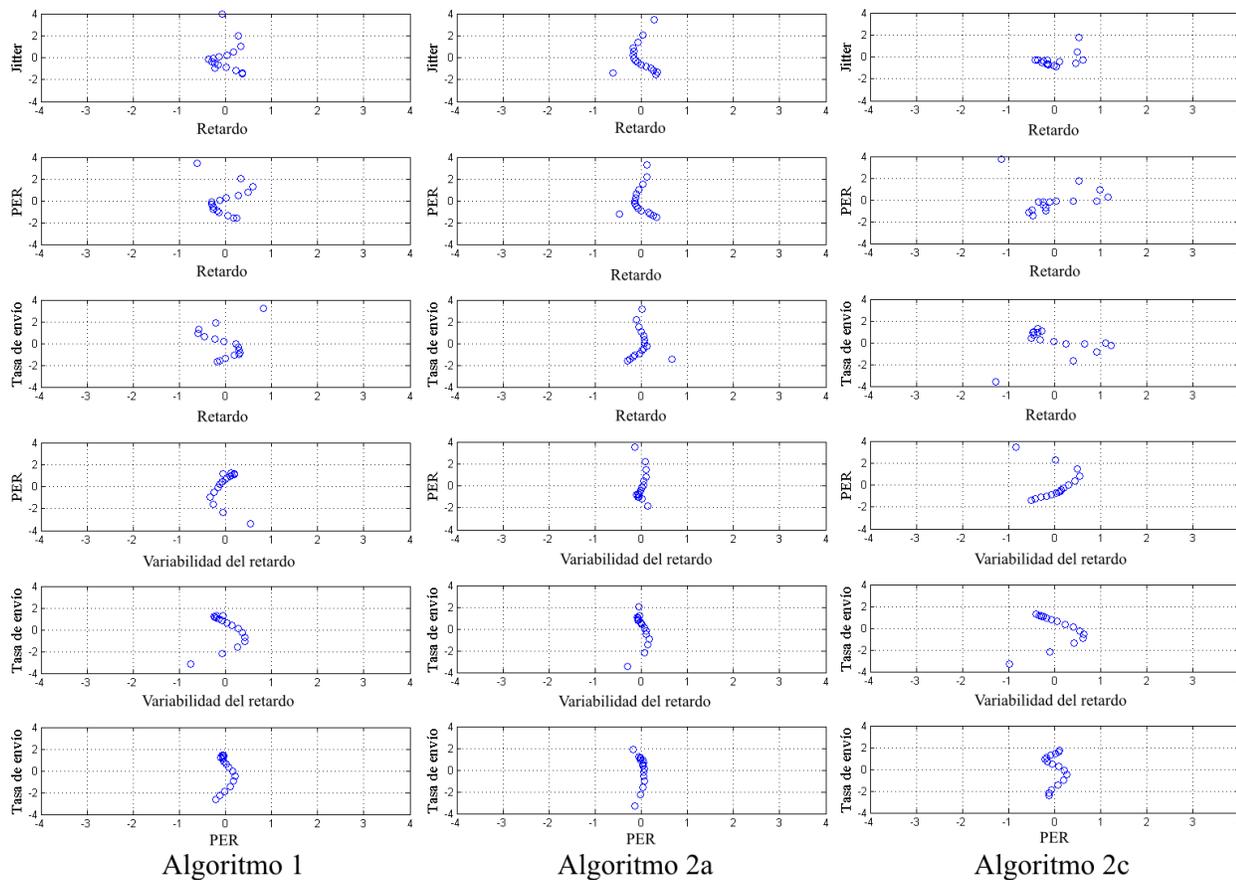


Figura 5.9: Factores de importancia entre los parámetros promedio seleccionados

### 5.2.3. Comportamiento estadístico de los resultados de selección

En esta sección se presenta un análisis estadístico de los parámetros asociados con las clasificaciones.

Los histogramas mostrados a continuación permiten observar regiones donde los valores, máximos y mínimos, para cada parámetro se concentran en relación con su posición dentro de la clasificación.

En la Figura 5.10, se observa el resultado de la selección cuando el grado de importancia asignado a un atributo es máximo y lo que ocurre cuando éste es mínimo. Los dos ejes que conforman el plano horizontal en las dos gráficas superiores son el retardo, comprendido entre 0 y 500 ms, y el ranking, cuyos valores están entre 1 y 15. Las dos gráficas inferiores, corresponden a la tasa de envío.

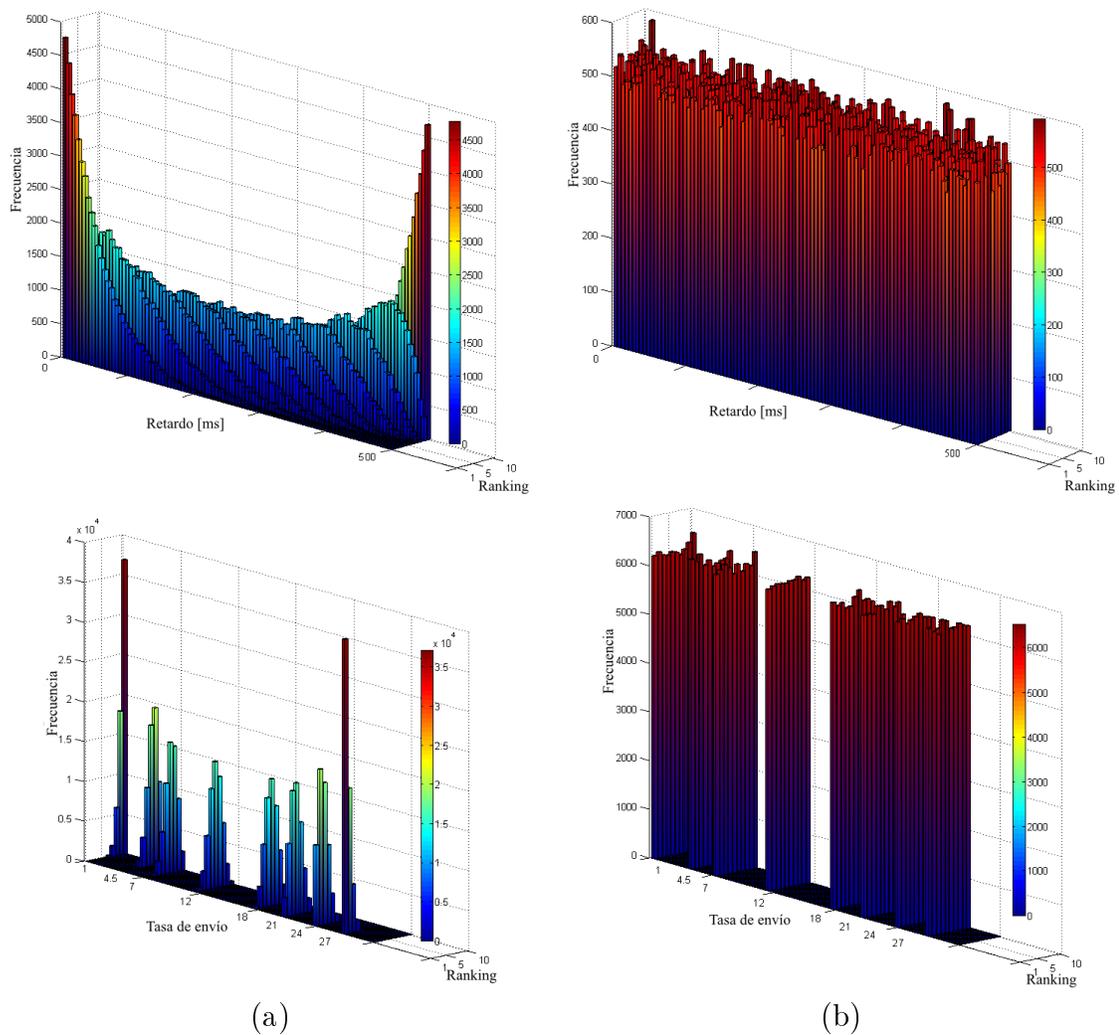


Figura 5.10: Distribuciones de los parámetros seleccionados.  
*a) Prioridad máxima; b) Prioridad mínima*

Una aplicación que se ve severamente afectada por el retardo, asignará un alto grado de importancia a este parámetro visto como un atributo de selección. En consecuencia, los retardos correspondientes a las redes seleccionadas como mejores deberán ser mínimos. La gráfica superior en la Figura 5.10a corresponde a un grado de prioridad máxima para el retardo. En esta gráfica podemos observar que los valores seleccionados en primer lugar están entre 0 y 80 ms, mientras que los valores clasificados como los peores están entre 430 y 500 ms.

Los algoritmos de decisión clasifican los mejores y peores parámetros asociados a un conjunto finito de redes alternativas. No obstante, no existe una garantía de que en cada proceso de selección existan alternativas cuyos parámetros sean los óptimos requeridos. Si en todo momento existiera al menos una red cuyos parámetros fuesen óptimos, no sería necesario un algoritmo de decisión.

Los histogramas descritos únicamente sirven para ejemplificar el comportamiento del algoritmo de decisión con respecto a criterios específicos. No obstante, en una aplicación real del algoritmo, no es útil concentrar la prioridad en un sólo criterio, ya que la decisión se realiza considerando simultáneamente todos los criterios. Existe una importante diferencia entre no contemplar un criterio para la toma de decisión y en asignarle un grado de prioridad mínimo. Los índices de prioridad asignados a cada criterio establecen un compromiso entre éstos, incrementado o disminuyendo el grado de selectividad.

La Figura 5.11, muestra el comportamiento estadístico resultante de los procesos de selección. Cabe mencionar que los perfiles de selección han clasificado los mismos datos de entrada.

El plano horizontal en cada histograma, está compuesto por dos ejes. El primer eje, es el correspondiente al parámetro o criterio de selección. Los valores mínimos y máximos de estos ejes coinciden con los de la Tabla 5.3. El segundo eje corresponde a la clasificación cuyos valores se encuentran entre 1 y 15. Las regiones de concentración comprendidas entre valores máximos o mínimos de ambos ejes, brindan una noción del grado de selectividad asociado a cada parámetro. No obstante, en cada histograma se incluye un recuadro con el índice de prioridad definido por el correspondiente perfil de selección.

Las cuatro gráficas en la columna izquierda muestran el comportamiento estadístico de los parámetros seleccionados por el Algoritmo 1. Observemos que para este perfil de selección, el retardo y la variabilidad del retardo son los parámetros con mayor importancia. Por otro lado, para el Algoritmo 2c, la variabilidad del retardo y la tasa de envío son los más relevantes. Notemos que la diferencia en la prioridad del retardo de estos perfiles, tiene un efecto directo en la distribución de los valores seleccionados.

Estas gráficas permiten observar la flexibilidad del Algoritmo 2 para ajustar los perfiles de selección en función de los requerimientos mínimos de QoS, de las aplicaciones activas. Es evidente que las variaciones en los ponderaciones de los parámetros impactan directamente los resultados de la selección. En general, los algoritmos de selección establecen un compromiso entre parámetros durante el proceso de selección.

---

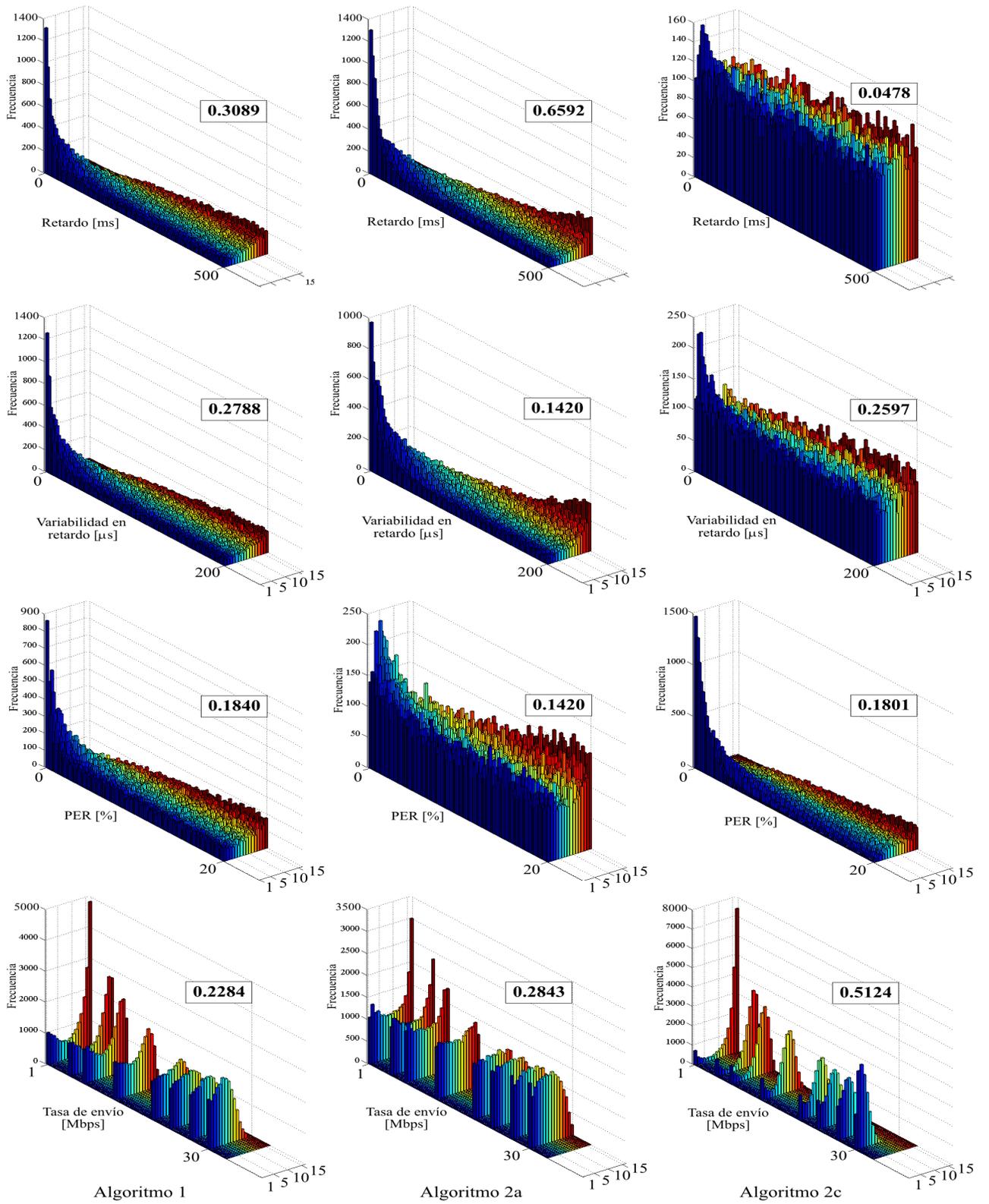


Figura 5.11: Histogramas de los valores seleccionados para cada parámetro

### 5.2.4. Latencia en el proceso de selección

El último parámetro de comparación entre los algoritmos es la *latencia en la toma de decisión*. Definimos latencia como el tiempo que transcurre desde que un conjunto de mediciones es alimentado a un algoritmo de decisión hasta que el algoritmo genera la clasificación resultante.

La latencia de los algoritmos de selección se ha evaluado variando la cantidad de redes alternativas sobre un amplio rango de valores. En la Figura 5.12 se muestra la latencia promedio en la toma de decisión en función de la cantidad alternativas.

Notemos que la latencia para hasta 20 redes alternativas está por debajo de  $250 \mu\text{s}$ , y aún para 100 redes, es inferior a los 2 ms.

Es importante resaltar que la latencia mostrada es obtenida a través de la herramienta de análisis numérico MATLAB, ejecutada sobre una arquitectura y un sistema operativo de 64 bits con un procesador de doble núcleo y una memoria RAM de 2 GB. Aun así, esto puede representar una latencia potencialmente baja pensando en un sistema de implementación. Finalmente observemos que la latencia inducida por ambos algoritmos es prácticamente la misma.

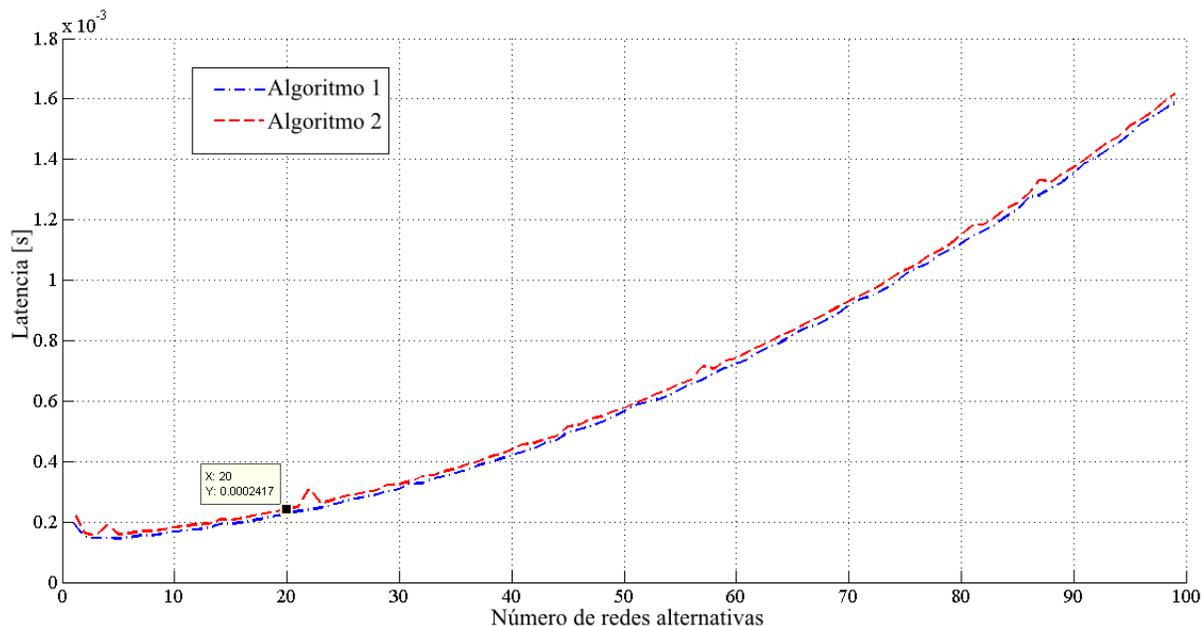


Figura 5.12: Latencia promedio de decisión al aumentar la cantidad de redes alternativas

## Conclusiones y trabajo futuro

---

En este trabajo se ha propuesto un algoritmo de decisión basado en procesos analíticos jerárquicos (AHP), para el proceso de *handoff* vertical. Se ha considerado el algoritmo propuesto en [21] como punto de partida. El estudio de este algoritmo ha permitido la identificación de aspectos susceptibles de cambios que constituyen nuestra propuesta. Por esta razón, el algoritmo en [21] y nuestra propuesta se han llevado a un marco de comparación, utilizando un enfoque de simulación numérica en MATLAB.

Los resultados muestran que cuando la cantidad de redes alternativas es menor a 6 el desempeño de ambos algoritmos es similar. Sin embargo, cuando las alternativas aumentan, el algoritmo descrito en [21] deja de ser consistente mientras que el comportamiento de nuestra propuesta sigue siendo adecuado.

El método AHP puede combinar información cualitativa y cuantitativa. Esta característica del método permite incluir los requerimientos mínimos de QoS asociados a las diferentes clases de servicio. Así es posible considerar la estrecha relación entre los parámetros retardo, variación del retardo, PER y tasa de envío, usados como criterios, y las clases de servicio, en términos de los requerimientos de QoS.

La inclusión explícita de las clases de servicio conversacional, interactivas y streaming como elementos de decisión, permiten ajustar la selectividad del algoritmo propuesto. Esta es una característica con la que no cuentan los mecanismos de selección descritos en el estado del arte.

El método AHP no ha sido diseñado para aplicarse en escenarios donde las medidas de los criterios varían en función del tiempo. Así, la incertidumbre en la clasificación de las alternativas dependerá de la variabilidad de las medidas alimentadas al método. Por lo anterior, un análisis de la permanencia temporal de las clasificaciones resultantes sería una importante contribución en un trabajo futuro.

Hasta ahora, son pocas las propuestas acerca del uso de los métodos MADM para resolver el problema de selección en el *handoff* vertical. El análisis desarrollado en este trabajo, muestra que ligeras modificaciones al método AHP lo habilitan para su aplicación en entornos donde una alta variabilidad caracteriza las condiciones de las redes. Sin embargo, complementar este método con herramientas analíticas de procesamiento de señales, por ejemplo algoritmos de predicción, puede representar futuras líneas de investigación sólidas.

En nuestra propuesta de solución se asume que es el dispositivo móvil el que desarrolla el proceso de selección, y no se consideran los efectos que una decisión de *handoff* pueda tener

en las redes. Así, desarrollar un algoritmo de decisión que optimice el uso de los recursos disponibles brindando soporte a los requerimientos de QoS, es un problema importante por resolver.

Cabe mencionar que, con los resultados obtenidos durante la realización de este proyecto se presentó un artículo en el VIII Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico (CIINDET 2010).

---

# Referencias

---

- [1] Stevens-Navarro, Enrique, y W.S.Wong, Vincent, *Comparison between vertical handoff decision algorithms for heterogeneous wireless networks*, Proceedings of the IEEE 63th Vehicular Technology Conference, 947-951, mayo 2006.
- [2] Gustafsson, Eva, y Jonsson, Annika, *Always Best Connected*, IEEE Wireless Communications 10(1), vol. 10, 49-55, febrero 2003.
- [3] Kassar, Meriem, Kervella, Brigitte, y Pujolle, Guy, *An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks*, Comput. Commun. 31, vol. 31, Butterworth-Heinemann, junio 2008.
- [4] Oliva, A. De La, Banchs, A., Soto, I. Melia T., y Vidal, A., *An overview of IEEE 802.21: media-independent handover services*, Wireless Communications, IEEE 15, vol. 15, 96-103, agosto 2008.
- [5] Kibria, M. Rubaiyat, y Jamalipour, Abbas, *On Designing Issues of the Next Generation Mobile Network*, IEEE Network 21(1), vol. 21, IEEE Communications Society, 6-13, Ed. Nikolaidis, Ioanis, enero 2007.
- [6] Nguyen-Vuong, Quoc-Thanh, Agoulmine, Nazim, y Ghamri-Doudane, Yacine, *Terminal-Controlled Mobility Management in Heterogeneous Wireless Networks*, Communications Magazine, IEEE, Communications Magazine, IEEE 45(4), vol. 45, 122-129, 2007.
- [7] Koutsorodi, Artemis A., Adamopoulou, Evgenia F., Demestichas, Konstantinos P., y Theologou, Michael E., *Terminal management and intelligent access selection in heterogeneous environments*, Mob. Netw. Appl. 11, vol. 11, Kluwer Academic Publishers, 861-871, diciembre 2006.
- [8] Bari, Farooq, y Leung, Victor C. M., *Automated network selection in a heterogeneous wireless network environment*, IEEE Network 21(1), vol. 21, 34-40, 2007.
- [9] Jesus, Vitor, Sargento, Susana, Corujo, Daniel, Senica, Nuno, Almeida, Miguel, y Aguiar, Rui L., *Mobility with QoS Support for Multi-Interface Terminals: Combined User and Network Approach*, ISCC'07, 325-332, 2007.

- [10] Mohanty, Shantidev, y Xie, Jiang, *Performance analysis of a novel architecture to integrate heterogeneous wireless systems*, Comput. Netw. 51, vol. 51, Elsevier North-Holland, Inc., 1095-1105, marzo 2007.
  - [11] Hasib, Abdul, y Fapojuwo, Abraham O., *Analysis of Common Radio Resource Management Scheme for End-to-End QoS Support in Multiservice Heterogeneous Wireless Networks*, IEEE Transactions on Vehicular Technology 57, vol. 57, 2426-2439, 2008.
  - [12] Bernaschi, Massimo, Pescape, Antonio, Cacace, Filippo, y Za, Stefano, *Analysis and Experimentation over Heterogeneous Wireless Networks*, Proceedings of the First International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the DEvelopment of NeTworks and COMmunities, IEEE Computer Society, 182-191, 2005.
  - [13] Zhang, Wenhui, Jaehnert, J., y Dolzer, K., *Design and evaluation of a handover decision strategy for 4th generation mobile networks*, Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual 3, vol. 3, 1969-1973, 2003.
  - [14] Ali-yahiya, Tara, Sethom, Kaouthar, y Pujolle, Guy, *Seamless Continuity of Service across WLAN and WMAN Networks: Challenges and Performance Evaluation*, IEEE, mayo 2007.
  - [15] Zhang, Yongqiang, Zhuang, Weihua, y Saleh, A., *Vertical Handoff between 802.11 and 802.16 Wireless Access Networks*, Global Telecommunications Conference. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE, diciembre 2008.
  - [16] Stevens-Navarro, E., Shah-Mansouri, V., y Wong, V.W.S., *Handoff Management and Admission Control Using Virtual Partitioning With Preemption in 3G Cellular/802.16e Interworking*, Vehicular Technology, IEEE Transactions on 59(1), vol. 59, 431-445, enero 2010.
  - [17] Zhu, Fang, y McNair, J., *Optimizations for vertical handoff decision algorithms*, Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE, vol. 2, 867-872 Vol.2, marzo 2004.
  - [18] Ormond, O., Murphy, J., y Muntean, G.M., *Utility-based Intelligent Network Selection in Beyond 3G Systems*, Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on, vol. 4, 1831-1836, junio 2006.
  - [19] Yoon, Paul y Ching-Lai, Hwang, *Multiple Attribute Decision Making: An Introduction*, Sage Publications, 1995.
  - [20] Zahedi, Fatemeh, *The Analytic Hierarchy Process: A Survey of the Method and Its Applications*, Management Sciences Department, vol. 16, 96-108, 1986.
-

- [21] Ramirez, R.A.V., and R., V.M. Ramos, *A vertical handoff decision algorithm which considers the uncertainty during the decision making process*, Wireless and Optical Communications Networks, 2009. WOCN '09. IFIP International Conference on, 1-6, abril 2009.
  - [22] Vaca Ramirez R.A. and Ramos R.V.M., *Handing Multiple Communications Sessions for the Next Generation of Wireless Networks*, Fifth International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC), 249-254, agosto 2010.
  - [23] Yang, Shun-Fang, Wu, Jung-Shyr, and Huang, Hsu-Hung, *A vertical Media-Independent Handover decision algorithm across Wi-Fi and WiMAX networks*, Wireless and Optical Communications Networks, 2008. WOCN '08. 5th IFIP International Conference on, 1-5, mayo 2008.
  - [24] Zhang, Wenhui, *Handover decision using fuzzy MADM in heterogeneous networks*, Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE, vol. 2, 653-658, marzo 2004.
  - [25] Manassero, G., Semeraro, Q., and Tolio, T., *A new method to cope with decision makers' uncertainty in the equipment selection process*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 53(1), vol. 53, 389-392, 2004.
  - [26] *IEEE Standard for local and metropolitan area networks - Part 21: Media Independent Handover Services*, IEEE Computer Society, enero 2009.
  - [27] Tee, Anna, Cleveland, Joseph R., and Chang, Jin Weon, *Implication of End-user QoS requirements on PHY and MAC*, IEEE 802 Executive Committee Study Group on Mobile Broadband Wireless Access , noviembre 2003.
  - [28] Szigeti, Tim, and Hattingh, Christina, *Quality of Service Design Overview*, Cisco Press, diciembre 2004.
  - [29] Meyer, Carl, **Matrix Analysis and Applied Linear Algebra**, SIAM, 2000.
-



---

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

---

## **Handoff vertical basado en procesos analíticos jerárquicos**

*Idónea comunicación de resultados que presenta*

**Carlos Ramírez Pérez**

*Para obtener el grado de*

**Maestro en Ciencias  
y Tecnologías de la Información**

Asesor:

**Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos**

Defendida públicamente en la UAM-Iztapalapa en septiembre de 2011  
frente al jurado calificador integrado por:

Presidente: Dr. Enrique Stevens Navarro, Facultad de Ciencias, UASLP  
Secretario: Dr. Víctor Manuel Ramos Ramos, Redes y Telecomunicaciones, UAM-I  
Vocal: Dr. Miguel López Guerrero, Redes y Telecomunicaciones, UAM-I