**Universidad de Málaga**
**Dpto. de Lenguajes y Ciencias de la Computación**

# MODELOS DE DECISIÓN LINGÜÍSTICA PARA LA QoS EN NETWORKING

**TESIS DOCTORAL PRESENTADA POR**

**Sergio Gramajo**

Málaga, España Septiembre de 2012

# MODELOS DE DECISIÓN LINGÜÍSTICA PARA LA QoS EN NETWORKING

## MEMORIA DE TESIS PRESENTADA POR

**Sergio Gramajo**

PARA OPTAR AL GRADO DE

DOCTOR EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

Director de Tesis: Dr. Luis Martínez López
Tutor: Dr. José Ignacio Peláez Sánchez

Málaga, España Septiembre de 2012

El Dr. D. Luis Martínez López, profesor del Departamento de Informática de la Universidad de Jaén, actuando como Director de la presente tesis doctoral,

El Dr. D. José Ignacio Peláez Sánchez, profesor del Dpto. de Lenguajes y Ciencias de la Computación, de la Universidad de Málaga, actuando como Tutor de la presente tesis doctoral:

# CERTIFICAN:

Que la tesis doctoral titulada "Modelos de Decisión Lingüística para la QoS en Networking" que presenta Sergio Daniel Gramajo para optar al grado de doctor, ha sido realizada bajo nuestra dirección y tutorización, cumpliendo los requisitos necesarios para su presentación, lectura y defensa.

En Málaga, a 3 de Octubre de 2012

El Doctorando

Fdo. D. Sergio Gramajo

El Director y Tutor:

Fdo. Dr. Luis Martínez López  Fdo. Dr. José Ignacio Peláez Sánchez

**A mi hijo Matias.**

# Agradecimientos

Quiero tomarme un tiempo para agradecer a tantas personas que de una manera u otra han hecho posible que este trabajo haya podido ser concluido.

En primer lugar quiero expresar un profundo agradecimiento a mi director de tesis, Luis Martínez, por su incansable ayuda y seguimiento desde mis inicios en la investigación. Y por supuesto a todo su equipo de trabajo por su colaboración y ayuda en todo momento. Sin ellos hubiera sido casi imposible finalizar esta tesis.

También debo manifestar mi más sincera gratitud por su apoyo constante y participación en el trabajo, desde que comencé el doctorado, a todos mis compañeros y amigos de trabajo y del grupo de investigación en la Universidad. Y mi reconocimiento y gratitud a José Ignacio y David por llevar adelante este doctorado.

Por último, pero no menos importante, a mis padres y Rocío por apoyarme y aguantarme durante todo el tiempo que estuve trabajando en la tesis.

Gracias a todos!!!

# Índice general

**Índice de figuras** VII

**Índice de tablas** XI

**1. Introducción** **1**

1.1. Motivación . . . . . 1

1.2. Objetivos . . . . . 4

1.3. Estructura . . . . . 5

**2. Networking y QoS** **9**

2.1. Conceptos Básicos de Networking y QoS . . . . . 12

2.1.1. Evolución de los Estándares de QoS . . . . . 16

2.1.2. Modelos Estandarizados de QoS . . . . . 19

2.2. Herramientas de Control de Tráfico . . . . . 26

2.2.1. Policing (Control) . . . . . 29

2.2.2. Classification Process (Clasificación) . . . . . 29

2.2.3. Queueing (Encolamiento) . . . . . 31

2.2.4. Traffic Shaping (Modelado de Tráfico) . . . . . 34

2.3. Implementación de Control de Tráfico con Software Libre . . . 36

2.3.1. Disciplinas de Colas y Clases . . . . . 38

2.3.2. Filtros e Identificación de Tráfico . . . . . 43

2.3.3. Construcción de un Sistema de CT . . . . . 44

**3. Toma de Decisión, QoS y Análisis de Decisión 51**

3.1. Toma de Decisiones . . . . . 52

3.1.1. Clasificación de Problemas de Toma de Decisión . . . . 54

3.1.2. Modelado de Preferencias en Toma de Decisión . . . . 60

3.1.3. Esquema Básico de Resolución de Problemas de Toma de Decisión . . . . . 64

3.2. Análisis de Decisión y QoS en Networking . . . . . 68

**4. Información Lingüística y Modelos Lingüísticos Computacionales 75**

4.1. Teoría de Conjuntos Difusos . . . . . 77

4.1.1. Conjuntos Difusos y Funciones de Pertenencia . . . . . 78

4.1.2. Funciones de Pertenencia Típicas . . . . . 81

4.1.3. Definiciones Básicas Relacionadas con los Conjuntos Difusos . . . . . 84

4.2. El Enfoque Lingüístico Difuso . . . . . 87

4.2.1. Elección de la Sintaxis de los Términos Lingüísticos . . 90

4.2.2. Semántica del Conjunto de Términos Lingüísticos . . . 93

4.3. Modelos Lingüísticos Computacionales . . . . . 95

4.3.1. Modelo Computacional Lingüístico Basado en Funciones de Pertenencia . . . . . 96

4.3.2. Modelo Computacional Lingüístico Basado en Conjuntos Difusos Tipo-2 . . . . . 98

4.3.3. Modelo Computacional Lingüístico Simbólico Basado en Escalas Ordinales . . . . . 99

4.3.3.1. Modelo Computacional Lingüístico Simbólico basado en Escalas Ordinales y el operador max-min . . . . . 100

4.3.3.2. Modelo Computacional Lingüístico Simbólico basado en Combinaciones Convexas . . . . . 101

4.3.4. Modelo Computacional Lingüístico 2-tupla. . . . . 102

**5. Modelo Lingüístico de QoS en Networking 109**

5.1. Modelos Computacionales para Información Lingüística Multigranular. . . . . 115

5.1.1. Jerarquías Lingüísticas . . . . . 117

5.1.2. Jerarquías Lingüísticas Extendidas . . . . . 125

5.2. Modelo de QoS en Networking Basado en Análisis de Decisión con Múltiples Expertos . . . . . 132

5.2.1. Definición del Marco de Trabajo . . . . . 135

5.2.2. Recopilación de Información. . . . . 142

5.2.3. Valoración de las Alternativas. . . . . 143

5.2.4. Proceso de Asignación de Prioridades. . . . . 147

**6. Implementación del Modelo en un Caso de Estudio Real 157**

6.1. Análisis de Decisión del Modelo QOSAD . . . . . 161

6.1.1. Definición del Marco de Trabajo . . . . . 161

6.1.2. Recopilación de Información . . . . . 168

6.1.3. Valoración de las Alternativas . . . . . 171

6.2. Asignación de Prioridades al Sistema de CT . . . . . 174

**7. Conclusiones Finales y Trabajos Futuros 181**

**Anexos** **187**

**A. Ejemplo de Construcción de un Sistema de CT en SWL** **189**

**B. Cuantificadores Lingüísticos Difusos** **203**

**Bibliografía** **209**

# Índice de figuras

2.1. Convergencia de Aplicaciones y Servicios en Redes IP. . . . . 11

2.2. Encapsulamiento del Modelo TCP-IP. . . . . 13

2.3. Evolución de Tecnologías de QoS. . . . . 16

2.4. Ruteador de Borde y de Núcleo. . . . . 21

2.5. Comportamiento Genérico del Tráfico en Sistemas de CT. . . 28

2.6. Uso de Colas para Priorizar la Conexión. . . . . 33

2.7. Operación Básica de Linux en Control de Tráfico. . . . . 37

2.8. Ejemplo de Jerarquía de Control de Tráfico. . . . . 40

2.9. Construcción de un Sistema de CT. . . . . 46

3.1. Teoría de la Decisión. . . . . 55

3.2. Clasificación de los Problemas de Toma de Decisión . . . . . 56

3.3. Resolución de los Problemas de Toma de Decisión. . . . . 65

3.4. Esquema de un Proceso de Toma de Decisión. . . . . 66

3.5. Esquema de Abstracción y Relación entre CT y el Proceso de AD. . . . . 70

3.6. Esquema de Básico de Análisis de Decisión. . . . . 72

4.1. Función de Pertenencia Trapezoidal. . . . . 83

4.2. Función de Pertenencia Triangular. . . . . 83

4.3. Función de Pertenencia Gaussiana. . . . . 84

4.4. Número Difuso Trapezoidal. . . . . 94

4.5. Ejemplo Semántico de la Variable Lingüística Altura. . . . . 94

4.6. Ejemplo Semántico con Función de Pertenencia Triangular. . . 95

4.7. Operador de Agregación basado en el Principio de Extensión. 97

4.8. Conjunto de Términos Lingüísticos Representado por Conjuntos Difusos Tipo-2. . . . . 98

4.9. Operador de Agregación del Modelo Simbólico. . . . . 102

4.10. Representación Lingüística 2-tupla. . . . . 105

5.1. Esquema de Abstracción entre CT y el Proceso de Decisión. . 112

5.2. Jerarquía Lingüística de 3, 5 y 9 Etiquetas. . . . . 121

5.3. Proceso Computación con Palabras. . . . . 125

5.4. ELH con 3, 5 y 7 Etiquetas Lingüísticas. . . . . 128

5.5. ELH con 5, 7 y 9 Etiquetas Lingüísticas. . . . . 129

5.6. Relación entre Escenario y Arquitectura de la Propuesta. . . . 133

5.7. Fases del Modelo de Decisión para QoS. . . . . 135

5.8. Alternativas Divididas en Niveles. . . . . 137

5.9. Proceso de Abstracción y Asignación de Prioridades. . . . . 149

5.10. Estructura de Implementación del Ejemplo 5. . . . . 154

6.1. Esquema de Red del Caso de Estudio Real. . . . . 159

6.2. Conjunto de Etiquetas Asignadas a los Expertos. . . . . 168

6.3. Opinión de $e_1$ en la Plantilla de Recopilación de Información con 5 Etiquetas Lingüísticas. . . . . 169

6.4. Opinión de $e_3$ en la Plantilla de Recopilación de Información con 7 Etiquetas Lingüísticas. . . . . 169

6.5. Opinión de $e_6$ en la Plantilla de Recopilación de Información con 9 Etiquetas Lingüísticas. . . . . 170

6.6. Estructura de Implementación. . . . . 177

A.1. Escenario de Ejemplo para aplicación con SWL. . . . . 190

A.2. Estructura Jerárquica del Ejemplo de Aplicación 1. . . . . 193

A.3. Estructura Jerárquica del Ejemplo de Aplicación 2. . . . . 201

B.1. Cuantificadores Lingüísticos Difusos Relativos. . . . . 207

# Índice de tablas

2.1. Clasificación de Investigaciones Realizadas. . . . . 19

3.1. Esquema General de un Problema de TD con un Único Criterio. 57

3.2. Esquema General de un Problema de TDMC. . . . . 57

3.3. Esquema General de un Problema de TD con un Único Experto. 59

3.4. Esquema General de un Problema de TDME. . . . . 60

5.1. Granularidad Necesaria para 3 Niveles de la LH. . . . . 120

5.2. Comparación de Enfoques. . . . . 132

5.3. Conjunto de Alternativas. . . . . 142

5.4. Recopilación de la Información. . . . . 143

5.5. Transformación de la Información Lingüística a 2-tupla. . . . . 146

5.6. Unificación de la Información Lingüística Multigranular en $t^* = 4$ . . . . . 146

5.7. Agregación de la Información. . . . . 147

5.8. Vector de Asignación de Prioridades. . . . . 153

5.9. Asignación de Prioridades. . . . . 154

6.1. Características de la Organización. Caso de Estudio . . . . . 158

6.2. Valoraciones Lingüísticas Expresadas por los Expertos. . . . . 171

6.3. Vectores de Preferencia en 2-tupla. . . . . 172

6.4. Unificación de la Información Lingüística Multigranular en $\overline{S}^{n(t^*)}$. . . . . 172

6.5. Valoraciones Globales para cada Alternativa. . . . . 173

6.6. Transformación de las Valoraciones Globales a $S_2^7 \in ELH$. . . 175

6.7. Distancias entre Valoraciones Globales de QoS y Prioridades. . 176

6.8. Resultados Finales de Asignaciones de Prioridades. . . . . 176

A.1. Ejemplo de Prioridades para Tipos de Tráfico. . . . . 192

# Capítulo 1

# Introducción

## 1.1. Motivación

Debido al creciente número de usuarios y aplicaciones que utilizan gran *cantidad* de recursos de networking en las organizaciones, surge la necesidad de administrar estos recursos limitados por el Ancho de Banda (AB) disponible para acceso a Internet u otras redes de forma eficiente. Dicha administración consiste en realizar un estudio y/o análisis preliminar de alternativas, variables y características propias del networking de una organización para satisfacer los requerimientos de aplicaciones críticas, y así mejorar su productividad. Este análisis es similar al que se realiza en los problemas de Toma de Decisiones (TD), en los que antes de tomar una decisión se lleva a cabo un proceso de análisis que permite a los administradores tomar decisiones de una forma racional y coherente. Por ello, la administración de los recursos de networking puede modelarse como un problema de análisis de decisión para dar soporte a la asignación de prioridades para las aplicaciones de networking en la organización según su grado de importancia.

Los administradores de red llevan a cabo un proceso de análisis de requerimientos en base a ciertas políticas de priorización de servicios, a su propio conocimiento en la asignación de Calidad de Servicio (QoS, Quality of Service), a las tecnologías a utilizar y a las necesidades propias de una organización[1] en particular. Usualmente, un administrador de red determina de manera arbitraria y a priori la asignación y calidad de los recursos a usuarios, servicios y aplicaciones. Para realizar estas tareas ellos necesitan de un conjunto de herramientas para proveer QoS en networking. El concepto de QoS para trabajo en red engloba un conjunto de tecnologías y estándares que intentan mejorar la transmisión de datos en el tiempo, garantizando ciertos niveles de calidad y prioridades para cierto tipo de tráfico de networking según las necesidades específicas de cada momento y organización.

Además hemos de tener en cuenta que diferentes administradores de red, responsables de tomar decisiones al asignar recursos de networking, pueden tener distintas apreciaciones de la importancia relativa de cada aplicación que hace uso de networking en la organización. También pueden tener distintas apreciaciones acerca de qué usuarios y servicios son más importantes y con qué grado de importancia. En este sentido, un experto *convencional* en nuestra propuesta es un administrador de red, sin embargo su visión técnica puede sesgar el funcionamiento de los servicios de red y su calidad, por lo que la participación de múltiples expertos que conozcan transversalmente la organización y puedan contribuir con su experiencia y conocimiento a la mejor distribución de estos recursos es importante y necesaria. Dichos expertos podrían saber qué alternativas son más importantes desde el punto de vista de productividad de la organización. Así, el proceso de prioriza-

[1]En esta memoria de investigación se hablará de organización para hacer referencia a empresas, corporaciones, universidades y organismos en general que cuenten con una red local con enlace a internet u otras redes basados en tecnología TCP/IP [38].

ción de recursos involucrará visiones tanto tecnológicas como estratégicas de la organización, siendo estas últimas independientes de criterios técnicos de networking. Por lo tanto, este proceso permitirá que la valoración pueda ser realizada tanto por administradores como por usuarios encargados de tomar decisiones de QoS independientemente del conocimiento de networking de cada uno de ellos. En estos casos, los expertos se abstraen de la gran complejidad del problema y se enfocan en su conocimiento para participar del proceso de priorización de recursos de networking en la organización.

La heterogeneidad de los expertos que pueden participar en la evaluación de recursos, la complejidad del problema en cuanto a multiplicidad de servicios, aplicaciones y usuarios de networking junto con la incertidumbre, vaguedad y/o subjetividad de la información proporcionada por los expertos involucrados, demanda herramientas de modelado de información flexibles y capaces de manejar la incertidumbre en dicha información. En este sentido, el uso de la aproximación lingüística difusa [182][183][184] para modelar este tipo de información y algunas de sus extensiones en Computación con Palabras (CW, Computing with Words) [72][96][101][142] facilitará el manejo y resolución del problema.

Además, debido al hecho que se desea modelar una situación con información lingüística, existe la necesidad de utilizar múltiples escalas. Esta necesidad está asociada al hecho de que el conocimiento de la situación que se desea modelar puede ser realizada por expertos con diferentes grados de conocimiento y/o experiencia, o expertos con diferentes roles dentro de la organización, por lo que el uso de múltiples escalas lingüísticas o dominios lingüísticos multigranulares para valoración de preferencias por parte de los expertos puede mejorar la resolución del problema.

Así, esta investigación centra su estudio en definir un modelo para la priorización de servicios, usuarios y aplicaciones a través de técnicas de QoS en networking trabajando con un modelo de toma de decisión multi-experto lingüístico multigranular.

## 1.2. Objetivos

El interés y propósito principal de esta memoria es profundizar en la aplicación del modelado lingüístico difuso en procesos de análisis de decisión sobre procesos de QoS definidos en marcos de evaluación con múltiples escalas lingüísticas o Información Lingüística Multigranular (ILM). Para realizar esto, se pretende desarrollar un modelo de decisión en un escenario de tráfico de datos correspondiente a QoS en networking que se basa en el modelado lingüístico difuso. En él, se considera que los expertos que participan del proceso de decisión tienen distinto grado de conocimiento sobre las alternativas del problema, por lo que el uso de distintos conjuntos de términos lingüísticos para expresar su conocimiento facilita la resolución del problema.

Para alcanzar dicho propósito los objetivos perseguidos en esta memoria son los siguientes:

1. Análisis de las herramientas y estándares de QoS ateniendo a su evolución y las nuevas tendencias de gestión *inteligente* de los recursos de networking donde será aplicable nuestra propuesta.

2. Estudio del tratamiento y modelado de la incertidumbre en el proceso de valoración de QoS para las aplicaciones y servicios que utilizan los usuarios de red.

3. Proponer un modelo con la utilización de múltiples escalas lingüísticas o contextos multigranulares para las valoraciones de distintos expertos proporcionando la resolución del problema que mejore la calidad de percepción de los usuarios de red en cuanto a productividad de la organización.

4. Definir la arquitectura que acople los procesos de Toma de Decisión (TD) y QoS para este problema.

5. Proponer una aplicación que integre los procesos y que permita la solución para el problema planteado.

## 1.3. Estructura

Para lograr los objetivos mencionados, esta memoria se estructura en los siguientes capítulos:

**Capítulo 2.** Realiza una introducción a las diferentes tecnologías y estándares de QoS en networking haciendo una cronología de su evolución y revisa las tecnologías más importantes mencionando su alcance de utilización. También se describen las metodologías y herramientas que permiten priorizar el tráfico de red según ciertas políticas de networking en una organización. El capítulo concluye con la revisión de las herramientas de Control de Tráfico en Software Libre y formaliza el proceso de construcción de un sistema de Control de Tráfico.

**Capítulo 3.** En él se presenta una revisión del proceso de Toma de Decisiones haciendo una clasificación de los distintos tipos de problemas y el

modelado de preferencias. Adicionalmente analiza la relación de los procesos de análisis de decisión con las técnicas de QoS y describe las fases básicas del proceso de decisión para un escenario de QoS.

**Capítulo 4.** Este capítulo revisa los conceptos básicos de la teoría de conjuntos difusos y el enfoque lingüístico difuso usados en nuestra propuesta. También revisa diversas mejoras para realizar procesos de computación con palabras prestando una mayor atención al modelo de representación de información lingüística 2-tupla y su técnica computacional, ya que es la base de representación y cálculo en nuestra propuesta de investigación.

**Capítulo 5.** Presenta un modelo novedoso de QoS en networking y las herramientas para manipular múltiples escalas lingüísticas. Posteriormente define la formalización para la resolución del problema de QoS en networking basándose en un esquema de análisis de decisión con información lingüística modelada en múltiples escalas. Para ello se formalizan las fases del proceso de análisis de decisión y se detalla el proceso de *abstracción* que permite la asignación de prioridades para los tipos de tráfico de networking y la construcción de la estructura jerárquica de Control de Tráfico.

**Capítulo 6.** Este capítulo muestra los resultados obtenidos con el modelo propuesto en el Capítulo 5 a través de un caso de estudio para una organización real. En dicha implementación partimos desde el análisis de la organización y completamos todas las fases del modelo lingüístico hasta mostrar los aspectos técnicos con una implementación de QoS basada en Software Libre.

**Capítulo 7.** Este capítulo concluye la memoria de investigación y presenta

las conclusiones finales sobre los resultados más relevantes de la investigación realizada, así como las futuras líneas de investigación a seguir. La memoria finaliza con una recopilación bibliográfica de las contribuciones más destacadas en la materia estudiada.

## Capítulo 2

# Networking y QoS

Antes de abordar la investigación sobre las tecnologías de QoS en Internet [6][57][147][154], es necesario realizar un repaso del concepto de networking sobre el *Protocolo de Internet* (IP, Internet Protocol)[38] y las aplicaciones que están guiando su evolución, ya que el interés de aplicación de esta memoria de investigación se basa en gran medida sobre estos conceptos.

Desde su creación, uno de los axiomas fundamentales del networking sobre IP [38] es que la red tiene que ser lo más *simple* que sea posible proveyendo un conjunto de funciones que permitan a los extremos cierta *inteligencia* para poder realizar la comunicación. La función mínima de la red IP simple es la conectividad, es decir, que el envío de información desde una fuente a un destino debe hacerse en un período de tiempo razonable, si es que existe una ruta entre ambos puntos [38]. La definición de período de tiempo razonable puede variar, pero en última instancia no hay garantía que todos los paquetes enviados puedan llegar al destino. De esta manera, se asume que las aplicaciones que utilizan la red sean inteligentes y realicen acciones para gestionar esta situación. Así, la red global IP o Internet es un conjunto descentralizado de redes interconectadas de alcance global que operan sobre

la familia de protocolos TCP/IP[1] [38].

Al tratarse de un concepto de concepción global, en empresas, universidades y organizaciones en general, ha habido un considerable incremento del uso de aplicaciones y servicios basados en networking, especialmente durante los últimos años. Al mismo tiempo, las aplicaciones se fueron multiplicando y diversificando (ver figura 2.1), y cada vez son más los usuarios que hacen uso de ellas, por lo que se necesita mayor funcionalidad para soportar estas aplicaciones y servicios tanto existentes como emergentes. Para dar soporte a esta situación, los proveedores de servicios y las empresas a menudo construyen redes separadas (enlaces individuales) para transmitir su tráfico de voz, vídeo, datos críticos y no críticos como una estrategia para garantizar cierto nivel de servicio para estos tipos de tráfico en la red [147]. Sin embargo, hay una tendencia creciente hacia la convergencia de todas estas redes en una red simple basada en paquetes del Protocolo IP como se observa en la Figura 2.1 [60][147][154].

La idea principal de convergencia es que se incluyan en un vínculo o enlace único las distintas aplicaciones y servicios de networking, lo que implica que es necesario contar con mecanismos para gestionar adecuadamente esta situación. Llevar a cabo procesos de gestión *inteligente* de los enlaces, dando mayor prioridad a los tipos de tráfico (diferentes aplicaciones, servicios y/o usuarios) críticos y menor prioridad a los tipos de tráfico irrelevantes que consumen grandes cantidades de recursos de networking, ayuda a mejorar la productividad y funcionalidad de las organizaciones. En esta memoria de investigación, consideramos esta tendencia para proponer un modelo de análisis de decisión que pueda ser compatible con la multiplicidad de aplicaciones,

[1]Por razones conceptuales y de simplicidad, en adelante, llamaremos a esta funcionalidad de Internet simplemente *networking*.

usuarios y servicios sobre un mismo enlace dentro de una organización.

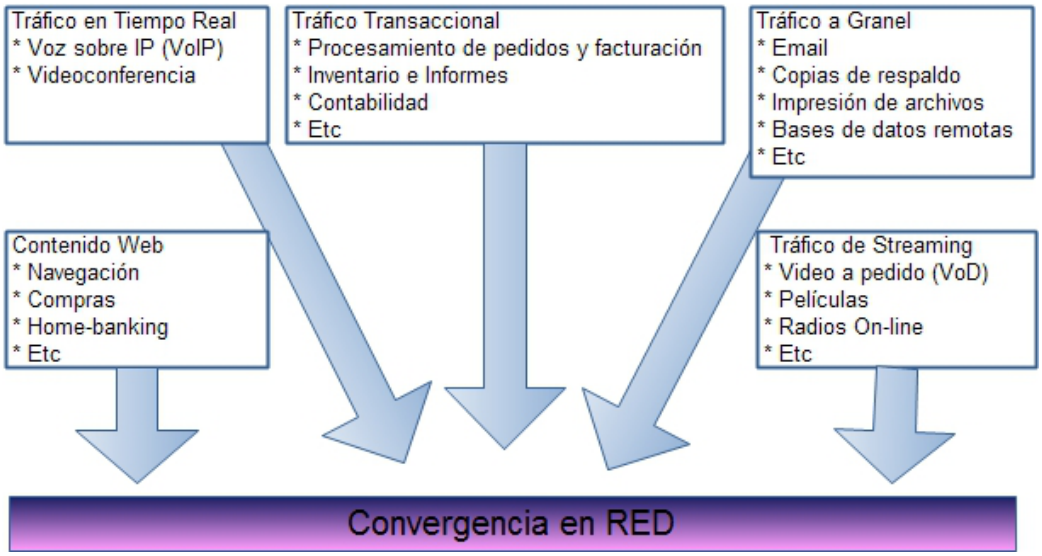



Figura 2.1: Convergencia de Aplicaciones y Servicios en Redes IP.

Para realizar esto, en este capítulo realizamos una revisión de conceptos básicos de redes con el objeto de mostrar el funcionamiento de diversas tecnologías de QoS en networking incluyendo los estándares más importantes que comprende y la cronología de implementación de dichos estándares. Posteriormente revisamos las herramientas relacionadas al Control de Tráfico (CT) que permiten modelar el tráfico de networking de acuerdo a necesidades particulares de QoS. La flexibilidad de las herramientas de CT están basadas en diversos conceptos básicos como la teoría de colas, las herramientas que definen las clases, políticas y filtros para el control de tráfico, la administración del ancho de banda en networking y los elementos que en ella intervienen; por lo que se abordarán estos conceptos haciendo hincapié en los problemas de priorización de tráfico según las necesidades particulares en el entorno de una organización. Finalmente, mostramos el proceso de construcción e implementación de un sistema de CT en Software Libre (SWL), específicamente en

el sistema operativo GNU-Linux dentro del ámbito de una organización, ya que nos permitirá desarrollar un ejemplo técnico útil para nuestra memoria de investigación.

## 2.1. Conceptos Básicos de Networking y QoS

Antes de revisar los modelos de QoS y su evolución, es necesario describir algunos conceptos básicos de networking debido a que haremos referencia a ellos en el resto de nuestra memoria de investigación. Estos conceptos son tipos de tráfico, flujos, paquetes y tramas, los cuales están relacionados con el modelo y la pila de protocolos TCP/IP ya que, éste es el ámbito donde nuestra propuesta será aplicable [38]:

- Un **Paquete** es un concepto de capa superior, representa unidades de la capa 3 (red) (ver Figura 2.2). Es normal que se hable de paquetes de forma imprecisa para referenciar unidades de distintas capas (como es nuestro caso en esta memoria de investigación).

- La palabra **Trama** es usada para describir una unidad de datos de capa 2 (enlace de datos) (ver Figura 2.2).

- Un **Flujo** es una conexión y transmisión de paquetes entre dos dispositivos. Los mecanismos de QoS separan el tráfico en clases o flujos y definen la asignación de recursos de ancho de banda para estas clases y el comportamiento del flujo en el enlace.

- Un **Tipo de Tráfico** es un flujo que tiene un medio para identificarlo y permite diferenciarlo del resto del tráfico. Por ejemplo un tipo de tráfico

puede ser el tráfico de correo electrónico, el cual tiene identificadores que permiten diferenciar este tipo de tráfico de otros como Voz sobre IP (VoIP), mensajería instantánea, etc.

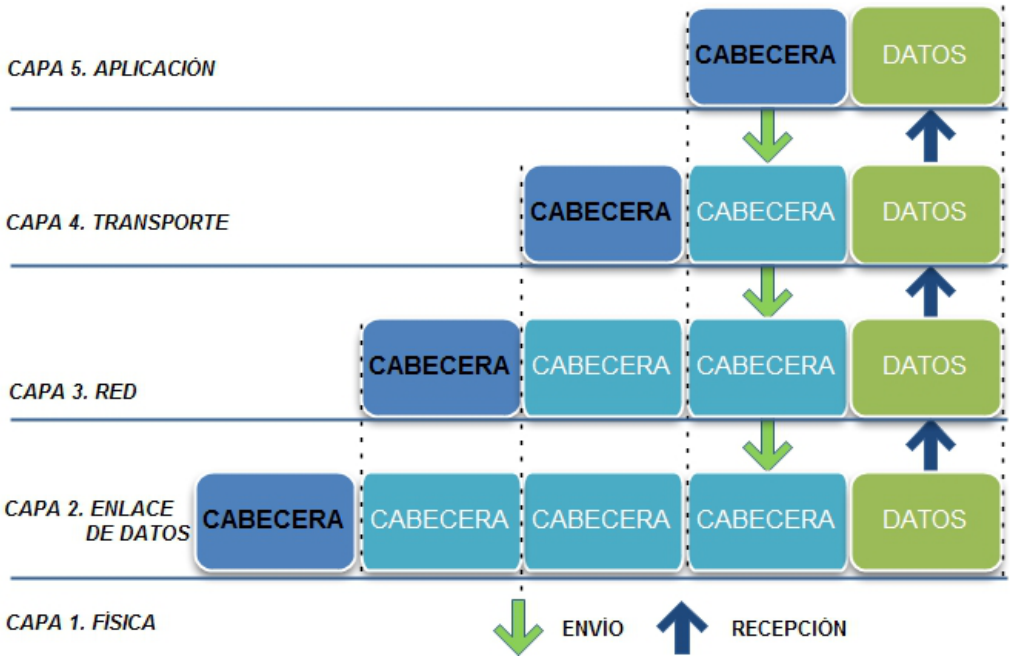



Figura 2.2: Encapsulamiento del Modelo TCP-IP.

Bajo el concepto TCP/IP, en una red los paquetes generalmente son diferenciados en un flujo básico por cinco campos, dirección IP fuente, dirección IP destino, campo de protocolo IP, puerto de origen y puerto de destino. Un flujo individual es generado desde una aplicación en un dispositivo fuente (computadora personal, servidor, smart-phone, tablet, etc.) hasta una aplicación en un dispositivo destino, y el paquete perteneciente a un mismo flujo tiene los mismos valores para los cinco campos mencionados[2]. Para dar soporte a tráfico de aplicaciones de voz, datos y vídeo con diferentes requerimientos de

[2]Para mayor detalle del funcionamiento de los protocolos de red y el formato de las cabeceras TCP e IP véase [38].

recursos, las redes IP necesitan diferenciar la información que circula por la red y clasificarla en tipos de tráfico. Sin embargo, con el servicio de funcionamiento básico de networking (servicio de mejor esfuerzo, que detallaremos más adelante), no es posible tal diferenciación entre los miles de flujos de tráfico existentes. Por lo tanto, no existen garantías o prioridades provistas para ningún tipo de tráfico. Vencer este impedimento esencial de las capacidades de las redes IP para transmitir tráfico con garantías de servicios es el objetivo buscado por la QoS en networking.

Las funciones de QoS intentan garantizar y brindar un servicio dando al administrador de red el uso y control de los recursos. Así, la QoS consiste en un conjunto de herramientas que dan solución a los requerimientos de servicios que debe cumplir la red en el transporte de un tipo de tráfico. En otras palabras, la QoS provee un servicio garantizado y control basado en medidas de desempeño de redes IP tales como la asignación de recursos, switching, routing, planificación de paquetes y mecanismos de descarte de paquetes [6][147][154].

Los principales beneficios de QoS son los siguientes:

- Permite a la red dar soporte a los requerimientos de nuevos servicios/aplicaciones emergentes multimedia.
- Da al administrador de red el uso y control de los recursos de networking.
- Provee garantía de servicio y la posibilidad de identificar y diferenciar tipos de tráfico. Se requiere que haya convergencia en una misma red de diferentes tipos de tráfico como voz, datos, vídeo, etc. (ver Figura 2.1).

- Capacita a los proveedores de servicios a ofrecer *servicios diferenciados* con Clases de Servicios (CoS). Los proveedores podrían categorizar y brindar diferentes tipos de servicios para los usuarios, por ejemplo podrían categorizar a los clientes como *preferenciales*, *importantes* y *comunes* y configurar la red para brindar servicios de manera acorde.

- Brinda a la red la posibilidad de identificar distintos tipos de tráfico de acuerdo a la cabecera de los paquetes. Con algunas herramientas, se permite identificar el tráfico por las expresiones regulares de las cabeceras de los paquetes para aplicaciones específicas. Un ejemplo de ello son los programas P2P (peer–to–peer) [63][126].

- Juega un rol esencial en nuevos servicios como Red Privada Virtual [65].

En un esquema con una convergencia de servicios, si llegase a ocurrir congestión, se retardan o descartan los paquetes. Una solución que se podría pensar es agregar más ancho de banda, pero esto no es suficiente, ya que el tráfico es típicamente en ráfagas, produciendo congestiones temporales, retardos y pérdidas. Por lo tanto, la clave está en dotar a la red de una mayor *inteligencia* mediante mecanismos para obtener QoS.

Hay que tener en cuenta que la QoS en sí no puede crear ancho de banda adicional, sino que debe manejar el tráfico de manera que el ancho de banda disponible soporte los requerimientos de un amplio rango de aplicaciones. Por lo tanto, el objetivo es cuantificar el tratamiento de un paquete a medida que circula por la red y dar a ciertos paquetes un mejor trato que a otros. En este sentido, existen numerosos estándares para networking con diferentes funcionalidades, entornos de aplicación y objetivos perseguidos.

En los siguientes apartados vamos a revisar la evolución de dichos estándares y los modelos de QoS para networking más relevantes.

### 2.1.1. Evolución de los Estándares de QoS

Las redes IP de mediados de los 90 eran invariablemente redes de mejor esfuerzo (best–effort networks), e Internet como un todo, permanece así hoy [147]. Sin embargo, las redes empresariales privadas y las redes de proveedores han sido transformadas de modelos de mejor esfuerzo a modelos más complejos de servicios diferenciados, lo cual significa que la red brinda diferentes niveles de servicio a aplicaciones diferentes (ver Figura 2.3 [147]).

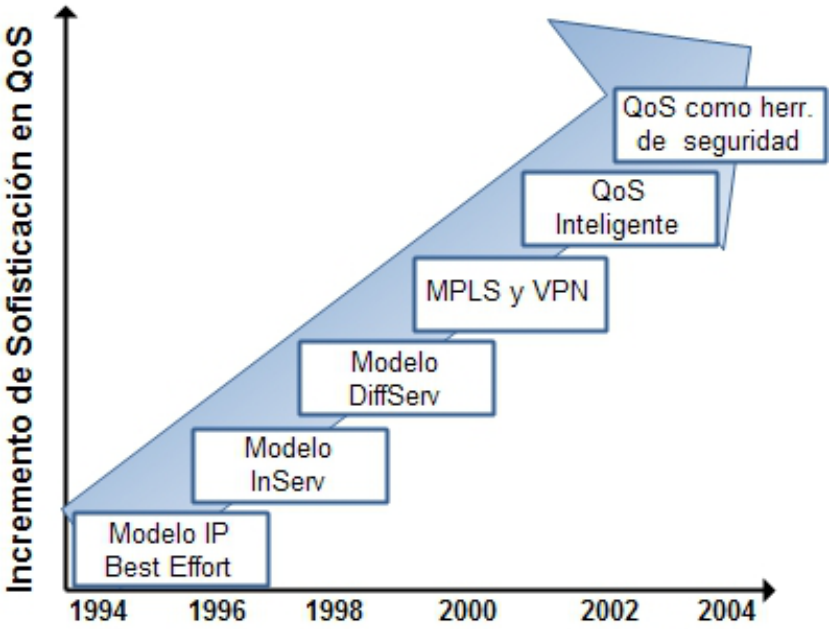



Figura 2.3: Evolución de Tecnologías de QoS.

El primer intento de estandarizar QoS llegó a mediados de los 90, cuando la IETF (Fuerza de Trabajo de Ingeniería de Internet – Internet Engineering

Task Force) publicó la RFC 1633 (Petición de Comentarios – Request for Comments) de Servicios Integrados (IntServ) [21]. Esta RFC se centraba en un protocolo de señalización denominado RSVP (Protocolo de Reserva de Recursos – Resource Reservation Protocol) [22]. RSVP reserva requerimientos de ancho de banda y latencia para cada sesión discreta en cada nodo de la red a lo largo de la ruta que los paquetes toman desde el extremo emisor hasta el extremo receptor. Inicialmente, RSVP requería que cada nodo mantuviera sus reservas de recursos para los paquetes, lo cual era realmente impracticable sobre Internet, en donde coexisten servidores, switches y ruteadores de distintas épocas, distintas características y fabricantes.

Con el objeto de mejorar estos inconvenientes, en el año 1998 emerge un conjunto de estándares denominados Modelo de Servicios Diferenciados (DiffServ) [14][68]. El modelo DiffServ describe varios comportamientos para ser adoptados por cada nodo, y cada nodo podía utilizar cualquier mecanismo (propietario o no) que estuviera disponible, elegido por el fabricante, para dar conformidad al estándar.

Como los modelos IntServ y DiffServ han evolucionado, la popularidad entre ambos métodos ha oscilado, y su coexistencia tiene seguidores de ambos lados. En la actualidad el debate sobre la ventaja de cada uno continúa sin una resolución clara y acordada por toda la industria. Ninguno de los dos métodos ofrece una solución completa y los elementos de ambos deberían combinarse para proveer un método más general aplicable a un rango más amplio de tipos de tráfico y aplicaciones [147]. Por lo tanto, sin una clara ventaja de cada modelo, los mecanismos de QoS continúan usando una combinación de los modelos IntServ y DiffServ para ofrecer los servicios requeridos en las redes.

Para el año 2000, las técnicas de QoS se volvieron más sofisticadas y fueron adaptadas a tecnologías de red avanzadas, como MPLS (Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo –Multiprotocol Label Switching) [138] y VPNs (Redes Privadas Virtuales – Virtual Private Networks) [65].

La tendencia más reciente en QoS es la simplificación y la automatización, con el objetivo de proveer de una manera simple y eficiente QoS *inteligente* sobre redes IP. Cuando se miran como funcionalidades individuales, las tecnologías de QoS ofrecen numerosos comandos sumamente complejos que pueden ser configurados [4][60]. En manos de un administrador capaz, esto puede ser utilizado para construir redes sofisticadas. Sin embargo, también puede resultar en configuraciones muy complejas. Muchos administradores no tienen el tiempo o las ganas de investigar a fondo las tecnologías de QoS y por otro lado preferirían definir políticas de alto nivel y dejar que la red *haga las cosas correctas* para implementarlas [66][147].

Además, en lo que se refiere a publicaciones científicas aplicadas sobre estándares, en los últimos años ha habido una considerable cantidad de investigación en el ámbito de QoS y soporte para sistemas multimedia distribuidos en diferentes medios físicos de transferencia [25][71][107][178]. Hasta la fecha, la mayor parte del trabajo se ha producido en el contexto de las arquitecturas de capas, como el sistema de plataforma distribuida, sistema operativo, el subsistema de transporte y red [25]. Adicionalmente se han propuesto modelos y frameworks basados en la solución del problema global de extremo a extremo para apoyo de las comunicaciones multimedia, así como también diversas arquitecturas y trabajos aplicados a diferentes tecnologías y estándares para lograr un nivel de QoS óptimo en redes [42][99]. En la Tabla 2.1 mostramos brevemente algunas publicaciones de investigación clasificadas

según el tipo de técnica y tecnología utilizada.

| Esquemas | Características | Referencia |
|---|---|---|
| Basados en agentes | Son esquemas de administración basados en sistemas de agentes o multiagentes capaces de comunicarse entre sí, que trabajan en forma cooperativa para brindar mayor QoS en demanda de servicios, redes inalámbricas, servicios web, etc. | [69], [128], [137] |
| Basados en Redes Neuronales y TD | Son esquemas basados en Redes Neuronales para la búsqueda de niveles de QoS dinámicos para maximizar la utilización de recursos multimedia, para control de admisión, etc. | [3], [125], [152] |
| Basados en Tecnología Inalámbrica | Son esquemas de QoS para redes inalámbricas que generalmente se utilizan para la eficiente asignación de recursos de voz, datos, vídeo y multimedia. | [26], [144], [188] |
| Basados en Tecnología Multimedia extremo a extremo | Son esquemas de QoS que proponen la eficiente asignación de recursos de voz, datos, vídeo y multimedia en todo tipo de redes locales, inalámbrica y globales. | [40], [41], [155] |

Tabla 2.1: Clasificación de Investigaciones Realizadas.

Si bien cada trabajo propuesto en la literatura es un modelo de funcionamiento con diversos fines, para su funcionamiento pleno necesitan estar vinculados con los modelos de networking estandarizados.

### 2.1.2. Modelos Estandarizados de QoS

Anteriormente se ha indicado que el tráfico en la red se compone de flujos o tipos de tráfico originados desde dispositivos o equipos finales por

una variedad de aplicaciones. Estas aplicaciones difieren en sus servicios y requerimientos de desempeño. En consecuencia, el objetivo buscado por la QoS en networking es dar un tratamiento diferenciado para ciertos tipos de tráfico según las necesidades específicas de una organización a medida que éste circula por la red. Pero esta afirmación no significa demasiado sin un modelo de red completo que describa cómo deben realizarse estos procesos. Es decir, que la capacidad de la red para realizar la entrega de servicios necesarios para aplicaciones específicas con algún nivel de control sobre las medidas de desempeño[3] están categorizadas en niveles de servicios.

Existe un número de conceptos que son comunes a cada nivel de enfoque [147] (ver Figura 2.4):

- Una red es caracterizada teniendo ruteadores de *núcleo* y de *borde*.
- Los ruteadores de borde aceptan tráfico de clientes dentro de la red y pueden identificar cómo admitir el tráfico que está siendo transmitido por la red.
- Los ruteadores de núcleo dan servicio de reenvío de paquetes entre los ruteadores de núcleo y/o los ruteadores de borde.
- Los ruteadores de borde, generalmente, son gestionados por las organizaciones, por lo que constituyen el punto para proveer QoS a la red interna de la misma.

El enfoque difiere en función de lo que se espera que hagan los ruteadores de *núcleo* o *borde* y cómo son coordinadas sus acciones para generar los servicios borde a borde o extremo a extremo deseados utilizando óptimamente

[3]Las medidas de desempeño de QoS son ancho de banda, retardo, variación del retardo y pérdida de paquetes [57][147][154].

los recursos internos de la red.

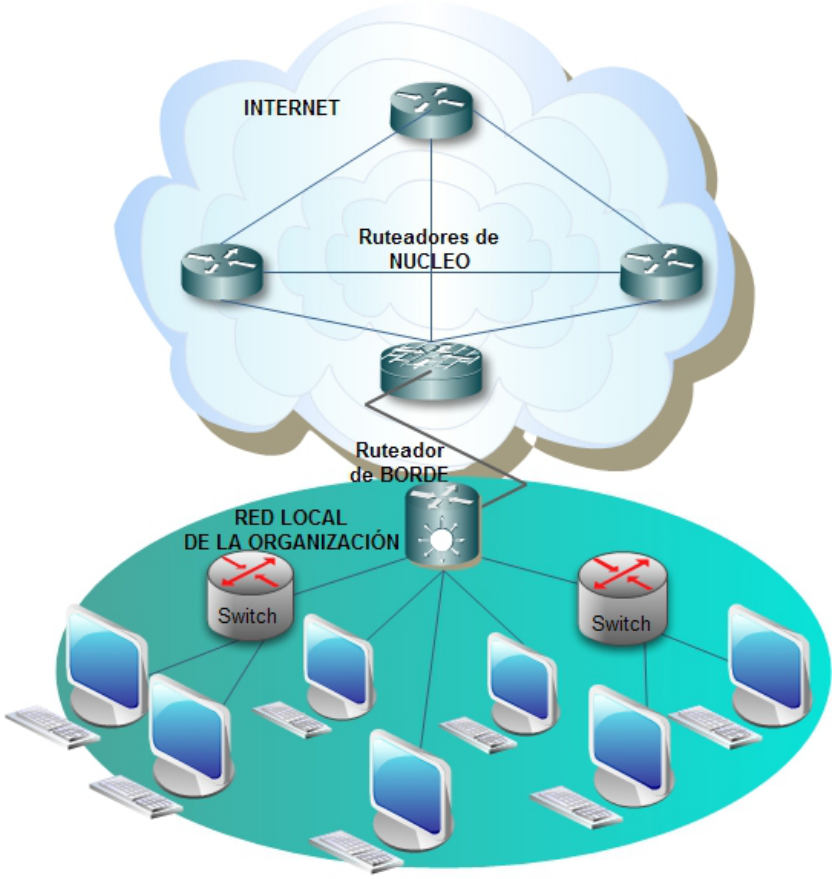



Figura 2.4: Ruteador de Borde y de Núcleo.

A continuación revisamos con más detalle cada uno de los modelos de QoS en orden cronológico [147]:

**1. Servicios de Mejor Esfuerzo (Best-Effort).** Como hemos mencionado, las redes IP transmiten paquetes con un tipo de servicio conocido como "Best-effort" que equivale a *lo mejor posible, lo antes posible* o simplemente *mejor esfuerzo* y es el servicio ofrecido actualmente por Internet. En lo que se refiere a conectividad básica, en el servicio de *mejor esfuerzo* no existen

garantías en la entrega del paquete al destino. Cuando estamos ante esta situación, usualmente un ruteador puede descartar paquetes en condiciones de congestión. Así, el servicio de mejor esfuerzo no es realmente una parte de QoS porque no es un servicio que provea garantía de entrega en el tráfico transmitido. La mayoría de las aplicaciones de transferencia de datos trabajan correctamente con el servicio de mejor esfuerzo aunque con rendimiento degradado. Para funcionar bien, todas las aplicaciones requieren una cierta asignación de recursos de red en términos de medidas de desempeño como ancho de banda, retardo y mínima pérdida de paquetes.

**2. Servicios Integrados.** IntServ es un modelo que especifica lo siguiente [147]:

- Qué está enviando el emisor (velocidad, unidad máxima de transmisión (MTU), etc).
- Qué necesita el receptor (ancho de banda, MTU, etc).
- Cómo es realizada la señalización y reserva de recursos sobre la red por el receptor y el emisor, es decir, el uso de RSVP.

En IntServ, los puntos extremos claves son las aplicaciones emisoras y receptoras que solicitan un nivel de servicio deseado a la red para un conjunto de flujos, definidos por sus direcciones de origen y destino, puertos origen y destino y protocolo de transporte. IntServ describe tres tipos principales de servicio que puede solicitar una aplicación:

- Servicio garantizado [145]. Es un servicio que requiere reserva de recursos por parte de la red para asegurar que la red cumpla requerimientos

de servicio específicos para un flujo de tráfico. Las aplicaciones que requieren este tipo de servicios incluyen aplicaciones de voz interactivas sobre Internet, aplicaciones multimedia de audio, vídeo y telefonía de Internet. Provee límites precisos (matemáticamente probables) sobre las demoras de encolado de paquetes extremo a extremo, haciendo lo posible por dar un servicio que garantice el ancho de banda y la demora.

- Carga Controlada [162]. Provee al flujo de la aplicación de una QoS equivalente a la que recibiría el mismo flujo en un elemento de red que se encuentra bajo muy poca carga, pero utiliza control de capacidad (admisión) para asegurar que el servicio es recibido aún si el elemento de red está sobrecargado.

- Servicio de Mejor Esfuerzo. No provee ninguna garantía de servicio de ningún tipo.

**3. Servicios Diferenciados.** En DiffServ, el tráfico es agrupado en clases basadas en sus requerimientos. Cada clase de tráfico es diferenciada por la red y atendida de acuerdo a los mecanismos de QoS configurados para la clase. Este esquema para el ofrecimiento de QoS es usualmente llamado Clase de Servicio (CoS, Class of Service).

DiffServ no da garantías de servicio de por sí. Solamente diferencia el tráfico y permite tratamiento diferencial de una clase sobre otra. Por esta razón este servicio es llamado *soft* QoS.

La premisa de DiffServ es muy simple, ofrece niveles de servicio de red diferentes a un paquete posibilitando la discriminación de servicio escalable en Internet sin la necesidad de estado por flujo y señalización en cada salto [127]. Los paquetes de un servicio particular pertenecen a una clase particular,

y el tratamiento de cada clase se describe en un *Comportamiento por Salto* (PHB, Per Hop Behavior) el cual debe cumplir el nodo de la red. Se pueden construir servicios significativos de acuerdo a lo siguiente:

- Activando un campo de la cabecera IP al momento de entrar en la red o en los bordes de la red.
- Usando este campo para determinar el reenvío de paquetes en los nodos dentro de la red.
- Condicionando a los paquetes marcados en los bordes de la red de acuerdo con los requerimientos o reglas de cada clase o servicio.

La esencia de DiffServ es la especificación de los PHBs que una aplicación puede recibir por parte de la red:

- Reenvío expeditivo (ExF, Expedited forwarding) [44]. Provee un servicio de prioridad estricta.
- Reenvío asegurado (AsF, Assured forwarding) [70]. Provee una garantía de entrega calificada y maneja la sobre-suscripción a este servicio (específicamente, esquemas de marcado o descarte para el tráfico excedente).
- Selectores de Clase (CS, Class Selectors) [127]. Provee códigos de puntos que pueden utilizarse para compatibilidad hacia atrás con el modelo de precedencia de IPV4 (IP Versión 4).
- Servicio de mejor esfuerzo (Best-Effort, Best Effort Service). Provee un servicio sin garantía como el mencionado anteriormente.

Diffserv construye servicios desde los PHB, clasificando paquetes en *clases* en el borde o límite de la red y marcando los paquetes correctamente. Opcionalmente, los paquetes pueden ser medidos con técnicas de vigilancia o modelado de tráfico. El núcleo de la red implementa los PHBs y utiliza las marcas de los paquetes para hacer el encolado y las decisiones de descarte de paquetes.

**4. Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo.** MPLS es una arquitectura de conmutación y encaminamiento de paquetes de alta velocidad que está diseñada para reenvío y conmutación de flujos de tráfico a través de la red. Es decir que integra sin discontinuidades las capas 2 (enlace) y 3 (red), combinando eficazmente las funciones de control de encaminamiento con la simplicidad y rapidez de la conmutación de la capa 2. La principal ventaja de MPLS es que al operar entre las *capas de enlace de datos* y *red* [57], es independiente de los protocolos de ambas capas como IP, ATM, Frame Relay, RSVP, etc. Cuando el paquete es transmitido de un ruteador a otro, cada ruteador debe decidir su reenvío independiente para cada paquete. Esto se realiza con la capacidad que tienen los ruteadores que soportan esta tecnología, *Label Switching Router* (LSR), de ejecutar algoritmos de encaminamiento basado en etiquetas.

Esto permite crear circuitos de extremo a extremo a través de cualquier tipo de medio de transporte, utilizando cualquier protocolo, lo que posibilita enfrentar problemas de velocidad, escalabilidad, QoS, ingeniería de tráfico y gestión de ancho de banda en redes troncales IP [154].

## 2.2. Herramientas de Control de Tráfico

Debido a que el servicio de mejor esfuerzo no garantiza que los paquetes lleguen a tiempo, en el orden correcto ni permite la gestión de los recursos de la red; han surgido diversos modelos como los revisados anteriormente (DiffServ, IntServ, etc.) (ver Sección 2.1.2) que permiten brindar mayor prioridad a los tipos de tráfico importantes a expensas de otros tipos de tráfico menos importantes que puedan retrasarse o descartarse.

Para dar soporte a la implementación de estos modelos existen diversas herramientas y dispositivos [4][6][60][147][154]. En esta memoria de investigación nos vamos a centrar en las herramientas de Control de Tráfico ya que permiten implementar los modelos revisados anteriormente y adicionan múltiples funcionalidades basadas en estándares conocidos. Además permiten contar con un mecanismo para administrar el tráfico en los bordes de la red local de la organización de un modo lo suficientemente flexible para gestionar todo el tráfico de red.

La administración correcta del tráfico debe permitir que las organizaciones cuenten con mejores condiciones de servicio y comportamientos predecibles en aplicaciones críticas ya que las decisiones sobre la calidad del servicio podrían ser tomadas localmente e implementadas en los ruteadores de borde con las tecnologías, técnicas y herramientas de CT.

La función principal de las herramientas de CT es proveer a las redes mayor confiabilidad haciendo frente a problemas de retardo en las trasmisiones, pérdidas de paquetes, ancho de banda y calidad de contenido para acceso a otras redes e Internet. Así, las organizaciones podrán administrar su tráfico

en los bordes de su red (Gateway de la red local), dando un control en tiempo real para los servicios y aplicaciones que comparten el ancho de banda (Ver *ruteador de borde* en la Figura 2.4).

Dichas herramientas de CT son implementadas en la capa de enlace de datos haciendo uso de un conjunto de sistemas de encolamiento y mecanismos por los cuales los paquetes son recibidos y transmitidos por el ruteador [4][60][63][88]. Esto es un proceso de toma de decisión que realiza el ruteador sobre el comportamiento y ordenamiento de los paquetes de la red. El término QoS se utiliza habitualmente como sinónimo de CT debido a que consiste en un grupo de herramientas que permiten a los administradores de red tener el control granular sobre estas colas y los mecanismos de encolamiento de un dispositivo de red para mejorar la eficiencia del enlace.

Existen diferentes escenarios en los cuales el CT puede ser útil con el objeto de maximizar el uso de una conexión de red en cuanto a las siguientes funciones [63]:

- Limitar o priorizar el ancho de banda.
- Limitar el ancho de banda de un usuario o servicio determinado.
- Maximizar el rendimiento de un enlace asimétrico y mejorar la productividad de las organizaciones.
- Reservar el ancho de banda para un usuario o aplicación particular.
- Dar prioridad al tráfico sensitivo de latencia o crítico.
- Permitir la distribución equitativa de ancho de banda no reservado.
- Asegurar que un tipo particular de tráfico sea rechazado.

Una de las ventajas que ofrece el CT cuando se emplea apropiadamente es lograr un uso predecible de los recursos de la red, donde el tráfico innecesario tiene limitado el uso de recursos y el tráfico crítico tiene una determinada prioridad en el uso de los recursos.

Por otra parte, si la configuración del CT se realiza mediante una política clara, los usuarios sabrán qué esperar del comportamiento de la red, mejorando así su percepción de la misma. Sin embargo, en lo que respecta a desventajas de utilizar CT, la complejidad de configuración es muy significativa debido a que se requieren conocimientos avanzados de las herramientas disponibles y las tecnologías de red.

En esta sección se revisan conceptos relacionados con el CT que permiten identificar, clasificar, encolar y priorizar los paquetes de acuerdo a un proceso de recorrido genérico del tráfico de red, como puede observarse en la Figura 2.5. Dicho proceso representa el ingreso de distintos tipos de tráfico, las acciones que toman los dispositivos de CT y cómo egresan los paquetes de acuerdo al comportamiento de servicio que se espera de la red.

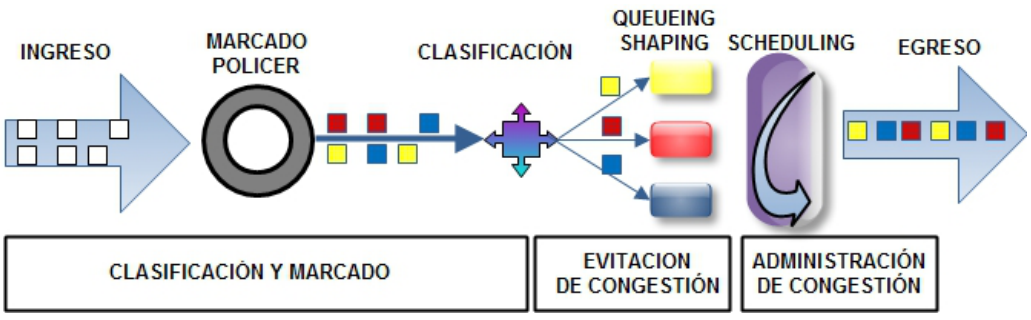



Figura 2.5: Comportamiento Genérico del Tráfico en Sistemas de CT.

### 2.2.1. Policing (Control)

Este es un mecanismo mediante el cual el tráfico puede ser limitado en su ingreso (ver Figura 2.5). Se utiliza frecuentemente en el borde de la red para asegurar que el enlace no consuma más recursos de los que tiene asignado. El controlador acepta el tráfico a una cierta velocidad y se toman medidas con el tráfico que exceda esa velocidad como descarte de paquetes excedentes o reclasificación de los mismos. Los sistemas operativos de enrutamiento más comunes usan típicamente dos tipos de mecanismos de regulación: policing y shaping (control y ajuste). Ambos mecanismos responden de manera diferente ante los paquetes que tienen que gestionar:

- Un controlador (policer) típicamente descarta el tráfico y reescribe su precedencia IP reseteando el campo TOS (Tipo de Servicio - Type of Service) en el encabezado del paquete IP.
- El *shaper* retrasa el paquete usando un búfer o mecanismo de encolamiento para retener los paquetes cuando la velocidad excede lo esperado. Este concepto se detallará más adelante.

### 2.2.2. Classification Process (Clasificación)

Identificar y categorizar los tipos de tráfico que compiten por un ancho de banda limitado es el primer paso hacia la comprensión y la solución de los problemas de rendimiento de una red. La clasificación es el proceso mediante el cual los paquetes son separados para diferente tratamiento, posiblemente diferentes colas o clases de salida. Durante el proceso de aceptar, enrutar y transmitir un paquete, un dispositivo de red puede clasificar el paquete de un

número de maneras diferentes y esa clasificación puede incluir el marcado de paquetes para poder identificarlos y darles un tratamiento particular. Este proceso necesita de un descriptor de tráfico para categorizar un paquete, lo que permite particionar el tráfico de red en clases de servicios o niveles de prioridad, es decir, aplicarle QoS. Tanto los *traffic policers* como los *traffic shapers* se basan en la clasificación de los paquetes para asegurar asignación del servicio adecuado.

Anteriormente los métodos de clasificación estaban limitados al contenido del encabezado del paquete, sin embargo, actualmente los métodos de marcado para la clasificación permiten poner información en los encabezados de las capas de enlace de datos, red, transporte, el área de datos del paquete, esto es, información propia de una aplicación particular o incluso una combinación de los anteriores. Como puede observarse en la Figura 2.2 las clasificaciones de los paquetes pueden realizarse en toda la pila de protocolos TCP/IP de acuerdo a las siguientes posibilidades:

1. **Capa 5.** Mediante reconocimiento de expresiones regulares de las cabeceras de los paquetes se puede identificar aplicaciones específicas.

2. **Capa 4.** Reconocimiento de puertos o rango de puertos TCP o UDP.

3. **Capa 3.** Direcciones IP, rangos de direcciones, subredes.

4. **Capa 2.** Direcciones MAC

5. **Marcas de QoS.** DiffServ, IP-ToS, MPLS, etc.

6. **Subclasificación HTTP.** Por URL, URL wildcare, tipo de contenido, tipo de navegador.

7. **Combinación.** Se pueden mezclar criterios de los métodos de clasificación anteriores y obtener una nueva clasificación.

Después de que un paquete ha sido identificado y clasificado, una red puede aceptar, sobrescribir o reclasificar un paquete de acuerdo a una política determinada.

### 2.2.3. Queueing (Encolamiento)

Las líneas de espera o colas y los sistemas de colas han sido sujeto de extensos estudios, desde el surgimiento de las telecomunicaciones hasta hoy [6]. A nivel de tráfico de datos, la Teoría de Colas pertenece a una rama aplicada de las probabilidades y los procesos estocásticos donde se busca estudiar el comportamiento de ingreso-egreso a una cola, los tiempos de servicio y espera para optimizar el funcionamiento [64].

En networking, los usuarios y aplicaciones compiten por el uso de recursos a medida que los paquetes fluyen a través de los nodos (ruteadores, switches, etc.) donde se procesan a una cierta velocidad, considerando el ancho de banda, el tamaño del búfer y la priorización del flujo de estos paquetes en la red. De acuerdo a este escenario, una cola es el sitio donde los paquetes esperan a ser transmitidos por el hardware, pero en sí misma, una cola no ofrece CT sino que al acoplarse con otros mecanismos pueden organizar, descartar, retrasar y priorizar paquetes en múltiples colas.

Básicamente una cola es un búfer conteniendo un número finito de ítems esperando una acción o servicio. De esta manera, los modelos de colas o disciplinas de colas permiten definir algún tipo de prioridad para las diferentes

clases de tráfico según sus características.

Existen diferentes disciplinas de colas, y cada una apunta a encontrar el balance entre complejidad, control y equilibrio evitando la congestión de la red. Es así como cada dispositivo de red puede contar con una disciplina de colas asociada, definiendo el algoritmo que indica cómo los paquetes encolados son tratados [39]. La disciplina de colas más simple puede consistir en sólo una cola, donde todos los paquetes son almacenados en el orden en el que llegan y se desencolan tan rápido como el siguiente dispositivo se lo permita. Una disciplina más compleja puede utilizar filtros para identificar diferentes clases de tráfico y procesar cada clase de forma diferente, por ejemplo dándole prioridad a alguna clase sobre otra. Las disciplinas de colas y las clases están muy relacionadas y se pueden combinar con los filtros.

Las tareas básicas que deben cumplir las disciplinas de colas son [39]:

- Soportar la distribución de los recursos de networking para cada una de las clases que compiten por un enlace de salida.
- Protección para que un pobre desempeño de una clase no afecte el desempeño de otras.
- Hacer el manejo inteligente del ancho de banda permitiendo que el ancho de banda disponible en una clase pueda ser usado por otra.

Las disciplinas de colas tradicionales son [43]:

- Colas FIFO (Primero en entrar primero en salir – First IN First Out).
- Colas PQ (Colas por prioridad – Priority Queue).

- Colas FQ (Colas justas – Fair Queuing).
- Colas WFQ (Colas justas por pesos – Weighted Fair Queuing).
- Colas WRR (Colas por pesos round-robin – Weighted Round Robin).
- Colas CBQ (Colas basadas en clases – Class Bassed Queing).

En este punto es importante destacar que las Colas de Prioridad (PQ) serán uno de los aspectos básicos de implementación para el modelo de decisión propuesto en esta memoria de investigación (ver Figura 2.6). Las colas PQ proporcionan un método para soportar clases de servicios diferenciados. Con esta disciplina, primero los paquetes se clasifican y luego son encolados en diferentes colas de prioridad. Los paquetes son enviados desde el tope de una cola determinada si todas las colas de mayor prioridad están vacías. Dentro de cada una de estas colas los paquetes se envían en orden FIFO.

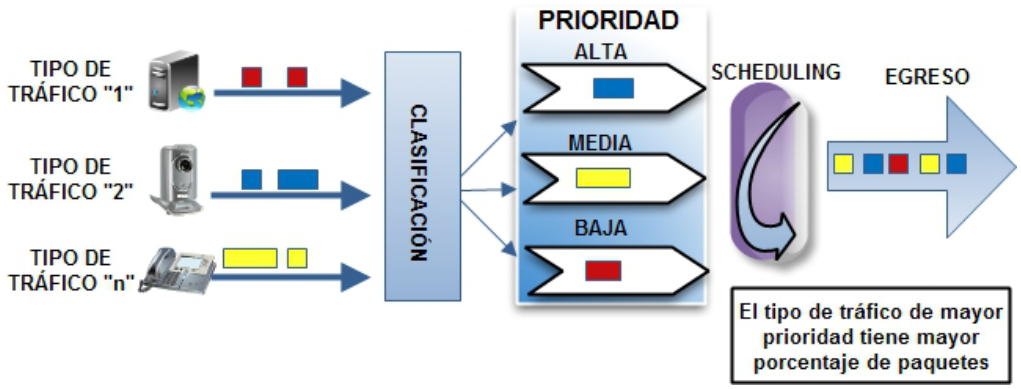



Figura 2.6: Uso de Colas para Priorizar la Conexión.

### 2.2.4. Traffic Shaping (Modelado de Tráfico)

Debido a su desarrollo funcional, como hemos mencionado, una de las desventajas más importantes de la pila de protocolos TCP/IP es la falta de habilidad para garantizar un ancho de banda determinado o cierta *calidad de conectividad* para usuarios y/o servicios. Sin embargo, la forma más simple de obtener QoS, desde la perspectiva de seguridad como funcionalidad, es que los administradores de red pongan en funcionamiento el control de tráfico en puntos bien definidos en la red. En este sentido, el Traffic Shaping (TS) actúa sobre paquetes IP en tránsito de acuerdo a parámetros configurables y lleva a cabo una serie de acciones:

- Aplicar límites de ancho de banda a los paquetes, encolando los paquetes que exceden los límites configurados. Este es un proceso de retraso de paquetes que permite evitar que excedan una tasa de transmisión máxima configurada.

- Descartar paquetes si el búfer está lleno. El paquete a descartar debe ser seleccionado entre los paquetes que causan congestión.

- Priorizar el tráfico de acuerdo a las necesidades del administrador. Si el tráfico de mayor prioridad se incrementa mientras un enlace está congestionado, entonces el tráfico de menor prioridad debe ser temporalmente limitado para dejar disponible mayor ancho de banda al tráfico con alta prioridad.

- Proporcionar un ancho de banda garantizado. Esto es realizado tratando cierto tipo de tráfico como de alta prioridad con un determinado ancho de banda garantizado y el resto del tráfico usa lo que queda

disponible de ancho de banda del enlace.

Los shapers tratan de medir la cantidad de tráfico priorizado y limitar el tráfico no priorizado dinámicamente de manera que no interfiera con el rendimiento del tráfico priorizado. Además, intentan limitar el tráfico para no exceder una velocidad configurada (frecuentemente medida en bits/segundo) y pueden suavizar el tráfico por ráfagas, siendo una de las mayores ventajas, la habilidad de controlar la latencia de los paquetes [4][60][88][154].

La gran ventaja del TS es que puede ser implementado en los bordes de la red de una organización para reservar la asignación del ancho de banda de manera flexible, es decir, que se podría identificar y asignar diferente calidad de servicio a usuarios, departamentos, aplicaciones y/o protocolos específicos.

Existen múltiples técnicas que pueden utilizarse en TS como CBQ (Class-based queueing). Esta es una técnica de encolamiento para tráfico de red que permite configurar las tasas de tráfico máximas convenidas dividiendo dicho tráfico en clases o colas. CBQ divide el tráfico de usuario en una jerarquía de clases basadas en una combinación de direcciones IP, protocolos y tipos de aplicación. Además, otras técnicas permiten realizar el ajuste de tráfico con protocolos como Frame Relay o directamente en la capa de transporte para manipular las velocidades de transmisión.

Finalmente, los *Organizadores* (Scheduling) (ver Figura 2.6) se encargan de organizar los paquetes para su salida, es decir, *Scheduling* es el proceso por el cual los paquetes son reorganizados entre la entrada y la salida de una cola particular. Desde una perspectiva más grande, cualquier conjunto de mecanismos de CT en una cola de salida, puede ser considerado como un *Scheduler*, ya que los paquetes son organizados para su salida. El *scheduler*

más común es el FIFO.

## 2.3. Implementación de Control de Tráfico con Software Libre

Existen diferentes alternativas libres y propietarias para llevar a cabo la implantación de QoS tanto en software como hardware. Una de estas alternativas está basada en software libre y el Sistema Operativo (SO) GNU/Linux, el cuál permite implementar QoS a través procesos de CT[4]. Estos procesos con sus funcionalidades van a ser útiles para culminar la construcción de la arquitectura del modelo propuesto en el Capítulo 5 y en el caso de estudio del Capítulo 6.

Este SO cuenta con un conjunto de herramientas que permiten gestionar implementaciones avanzadas en networking como el enrutamiento y la manipulación de los paquetes que se transmiten por la red de una manera flexible y acorde a los estándares. Un subconjunto de estas herramientas realiza procesos de CT y modelan el comportamiento que pueden tener los paquetes que son transmitidos por la red. Es decir, se puede decidir qué paquetes y a qué tasa de transferencia entran o salen de una interfaz y en qué orden se procesan. Con estas características funcionales es posible realizar diferentes tareas como:

- Limitar el Ancho de Banda (AB) del enlace.
- Limitar el AB para un cierto tipo de tráfico, servicio o usuario parti-

[4]Para mayor detalle de la estructura de funcionamiento del código del kernel de Linux en el manejo de networking y en CT ver [63] [88].

cular.

- Priorizar el tráfico crítico.
- Equilibrar el AB entre diferentes usuarios.
- Realizar balanceo de carga entre diferentes enlaces.
- Rechazar o limitar cierto tipo de tráfico particular integrándolo con herramientas de seguridad.

En la Figura 2.7 mostramos el esquema básico de funcionamiento del SO GNU/Linux como ruteador de red (ruteador de borde o ruteador de núcleo (ver Figura 2.4)). De un modo simple, en ella se observa que una interfaz de red se conecta a una red A, que puede ser la red local (LAN, Local Area Network) de la organización, y en otra interfaz se encuentra el enlace a la red B, que puede ser Internet. En el cuadro interno está la lógica de funcionamiento del SO en networking, encargada de tomar decisiones de comportamiento de los paquetes que ingresan y egresan de las interfaces.

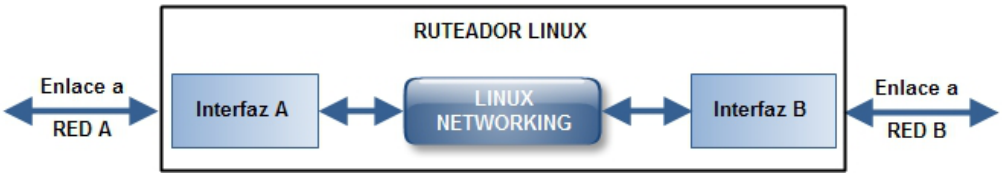



Figura 2.7: Operación Básica de Linux en Control de Tráfico.

En este caso, el proceso de funcionamiento es simplemente un ruteador que divide dos redes diferentes y que se encarga de realizar el control de tráfico dando la QoS necesaria. Para ello, es necesario construir un sistema de CT que modele el comportamiento de cada tipo de tráfico en la organización.

Para llevar adelante la idea de construir un sistema de CT con Software Libre para la organización es necesario realizar diversas tareas. Debido a ello, en las próximas secciones revisamos algunos conceptos básicos relacionados con tales tareas como son las disciplinas de colas, clases y filtros; y mostramos cómo interactúan entre sí para implementar los procesos de CT y proveer QoS con Software Libre, es decir, GNU/Linux. Finalmente, proponemos las etapas para construir un sistema de CT en la organización formalizando un caso genérico.

### 2.3.1. Disciplinas de Colas y Clases

Las disciplinas de cola (qdisc) consisten en diferentes algoritmos que se encargan de gestionar las colas en la interfaz de red con un proceso de control de ingreso y salida de paquetes mediante una estructura de clases, similar a un árbol, en las que hay dependencia de padre-hijo.

Existen dos tipos de disciplinas de colas, unas que permiten al usuario crear subdivisiones para realizar diferenciación en el tratamiento del tráfico llamadas *disciplinas de colas con clases* en tanto que otras no permiten esta funcionalidad denominadas *disciplinas de colas sin clases*. Además, para cada interfaz de red existe una qdisc que se adjunta a la interfaz llamada *qdisc raíz*, esto se debe a que también es la raíz de la estructura jerárquica en forma de árbol.

- **Disciplinas de colas simples, sin clases.** Las disciplinas de colas simples solamente aceptan el tráfico y se limitan a reordenarlo, retrasarlo o descartarlo. La qdisc simple utilizada por defecto es la PFIFO_Fast que no tiene clases y no puede añadir otras qdisc a ella. Básicamente

es una qdisc FIFO con tres bandas de distintas prioridades y dentro de cada banda se aplica FIFO. Otras qdisc simples son:

**TBF (Token Bucket Filter):** Su característica principal consiste en dejar pasar ciertos paquetes a una tasa de transferencia que no exceda lo administrativamente configurado, a no ser sólo por ráfagas cortas.

**SFQ (Stochastic Fair Queing):** Con esta qdisc, el ancho de banda se reparte equitativamente entre todas las conexiones, dando la misma oportunidad a todas las conexiones abiertas para enviar datos. El tráfico se divide en muchas colas FIFO, una por cada sesión TCP, esto la convierte en una disciplina útil cuando el enlace está congestionado o cuando existen programas que crean múltiples conexiones como los P2P.

- **Disciplinas de colas con clases.** Las qdisc con clases son muy útiles si existen diferentes tipos de tráfico a los que se quiere dar tratamiento por separado y gestionarlos con diferentes prioridades. Los paquetes son clasificados por medio de filtros que se encargan de decidir a qué clase deben ser asignados los paquetes.

  Como hemos mencionado, las disciplinas de colas siguen una estructura jerárquica en forma de árbol como se muestra en la Figura 2.8. Cada interfaz (tarjeta de red) tiene una *qdisc raíz* que está asociada a ella. A su vez, una qdisc con clases puede tener múltiples *clases hijas* y estas clases a su vez también pueden tener otras *clases hijas*. Las *clases terminales* son las que no tienen *clases hijas* y tienen una qdisc adjunta. A cada una de las clases terminales también se las denomina bandas.

Para identificar las qdisc y clases, se les asigna un controlador que consiste en dos partes separadas por dos puntos, un número mayor y un número menor (≪mayor:menor≫) (Ver Figura 2.8).

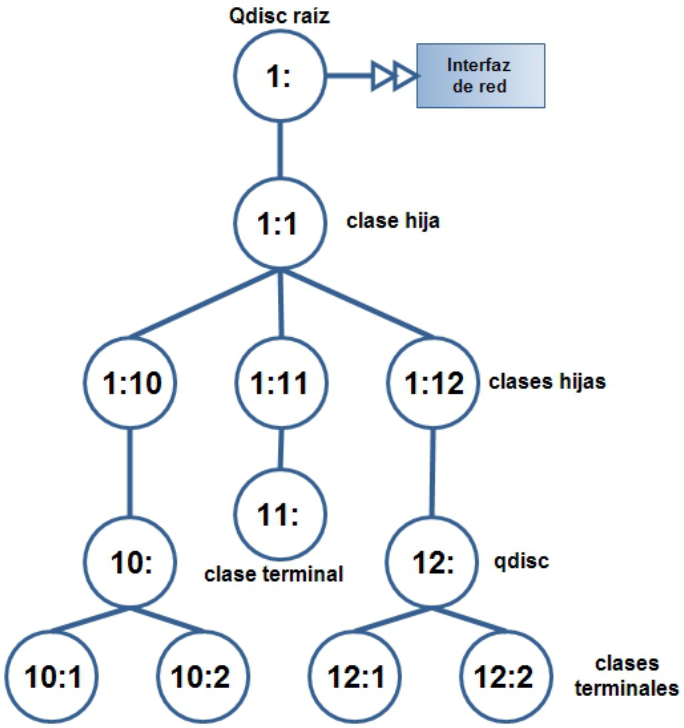



Figura 2.8: Ejemplo de Jerarquía de Control de Tráfico.

Teniendo en cuenta esto podemos mencionar algunas consideraciones generales para crear la estructura jerárquica:

- Es habitual darle a la qdisc raíz el controlador ≪ 1 : ≫, que es lo mismo que ≪ 1 : 0 ≫.
- El número menor de una qdisc siempre es 0.
- Las clases deben tener el mismo número mayor que sus padres y este número mayor debe ser único para una configuración de ingreso o

egreso.

- El número mayor de una qdisc puede coincidir con el número menor de la clase padre.
- El número menor debe ser único dentro de una qdisc y sus clases.
- Las clases terminales son las que recibirán los paquetes identificados por los filtros como pertenecientes a tales clases. En cada una de ellas podemos establecer políticas diferentes: por ejemplo, la $\ll 10:1 \gg$ puede tener más prioridad que la $\ll 10:2 \gg$, la $\ll 11:0 \gg$ puede tener más ancho de banda y así sucesivamente.
- Si no decimos nada, por defecto en cada clase terminal se asocia una qdisc FIFO.

**Comentario 1** *De acuerdo a los objetivos que hemos planteado para resolver el problema, con estas herramientas podemos establecer prioridades para las clases de manera que cierto tipo de tráfico asociado a una clase tenga más oportunidades de salir a la red que el de otra clase, incrementando así su rendimiento.*

Algunas de las qdisc con clases más utilizadas son las siguientes:

- **CBQ (Class Based Queue):** Es un método de encolamiento complejo que permite agrupar el tráfico en clases y compartir el ancho de banda del enlace. Las clases pueden tener una variedad de parámetros, como la prioridad, la interfaz o el programa de origen. Es uno de los métodos más antiguos aunque aún tiene problemas de rendimiento en algunos casos.

- **CSZ (Clark-Shenker-Zhang):** En este método de encolamiento, la idea principal es crear flujos denominados de *Espera Equitativa Ponderada* (WFQ, Weighted Fair Queuing) para cada servicio garantizado y reservar el resto de ancho de banda para el flujo que comprende los servicios predictivos y el tráfico de mejor esfuerzo. El control lo realiza un organizador de prioridades con la banda de máxima prioridad reservada para los servicios restringidos, y el resto se destina a los paquetes de mejor esfuerzo.

- **DSMARK (Diff-Serv Mark):** DSMARK es una disciplina de colas que ofrece las capacidades necesarias para los Servicios Diferenciados explicados en la Sección 2.1.2.

- **HTB (Hierarchical Token Bucket):** HTB permite dividir el ancho de banda disponible entre un mínimo y un máximo. El algoritmo asegura la disponibilidad del mínimo, y si se permite, alcanza el máximo. Además una clase puede pedir prestado ancho de banda sobrante que no se use en otras clases.

- **IMQ (Intermediate Queing Device):** Este método de encolamiento se usa para limitar el tráfico que puede llegar a la interfaz de red. Tiene utilidad para limitar el tráfico entrante y evitar algún tipo de desbordamiento no deseado.

- **WRR (Weighted Round-Robin):** Este método permite dar más *peso* a una dirección IP concreta y crear jerarquías balanceadas de tráfico.

- **RED (Random Early Detection):** Este método es utilizado para detectar la congestión. Se asegura de que la cola no se llene y fun-

ciona en conjunto con otro método de encolamiento denominado ECN (Explicit Congestion Notification).

- **PRIO (Priority):** La qdisc PRIO no hace ajustes, sino que subdivide el tráfico en bandas y asigna cada tipo de tráfico necesario basándose en la configuración de filtros. En la qdisc PRIO cada banda es una clase separada y cuando se encola un paquete esta qdisc escoge una clase basándose en los filtros. Esta qdisc es muy útil en caso de que se quiera dar prioridad a cierto tráfico sin usar sólo las marcas TOS (ver Sección 2.2.1) sino usando el potencial de los filtros para control de tráfico. También puede contener cualquier qdisc pero se recomienda utilizarla con una qdisc que realice ajustes. Hablando formalmente, la qdisc PRIO es un reorganizador conservativo.

### 2.3.2. Filtros e Identificación de Tráfico

La función principal de los filtros es asignar los paquetes o un cierto tipo de tráfico a las clases correspondientes a través de un potente conjunto de opciones. Para que los paquetes puedan ser asignados se procesan ciertas condiciones o características que deben cumplir.

Si estos paquetes cumplen determinadas condiciones entonces se asignan a la clase correspondiente la cual tiene un cierto comportamiento como por ejemplo la prioridad. Básicamente, lo que se hace es llamar a una cadena clasificadora (formada por todos los filtros asociados a la qdisc) que se encarga de tomar la decisión sobre la clase que debe procesar el paquete. Algunos filtros disponibles son:

- **fw:** Este tipo de filtro trabaja en conjunto con el firewall del SO y lo utiliza para identificar y marcar un determinado paquete, es relativamente simple y permite realizar filtros a múltiples niveles (ver Figuras 2.2 y 5.8).

- **u32:** Su funcionamiento en identificación del tráfico está basado en el contenido de los campos del paquete IP.

- **route:** Su funcionamiento en identificación del tráfico se determina por la ruta que tomará el paquete según la tabla de encaminamiento IP.

- **rsvp, rsvp6:** La identificación y asignación del tráfico se realiza con las rutas de los paquetes basadas en RSVP.

- **tcindex:** Se utiliza en la disciplina de colas DSMARK.

### 2.3.3. Construcción de un Sistema de CT

Debido a la cantidad actual y al número creciente de dispositivos que hacen uso de Internet es muy común que exista saturación de recursos donde los sistemas y usuarios críticos se ven afectados en su rendimiento por sistemas y usuarios menos prioritarios. La afectación del rendimiento implica que también se comprometa la productividad de la organización, por lo que es necesario implementar un sistema de control de tráfico para mejorar la calidad del servicio.

**Comentario 2** *Note que este escenario descrito es una situación muy común y que puede darse en cualquier tipo de organización como universidades, empresas, corporaciones, etc.*

En el proceso de construcción de un sistema de CT es necesario realizar diferentes tareas que definen el comportamiento de cada uno de los tipos de tráfico que se utilizan en la organización. Así, para dar generalidad al proceso de construcción de un sistema de CT vamos a considerar el diagrama de flujo compuesto por 5 etapas que representan tal construcción como puede observarse en la Figura 2.9 y describimos a continuación. Dichas etapas van desde un estudio preliminar de requerimientos hasta la implementación del sistema de CT completo.

### Etapas de Construcción del Sistema de CT.

Habiendo revisado los conceptos que nos permiten construir el sistema de control de tráfico, a continuación vamos a describir cada una de las etapas mostradas en la Figura 2.9.

### Etapa 1. Preliminares.

Esta etapa corresponde a aspectos técnicos relacionados con instalaciones del SO a usar y con diferentes aplicaciones de software para dar soporte al sistema de CT.

En esta memoria de investigación no vamos a describir en detalle esta etapa debido a que no es objeto de investigación en esta memoria, además se pretende que cada usuario seleccione las herramientas necesarias según su necesidad porque es un entorno muy cambiante. Sin embargo, ésta es una etapa importante que requiere profundos conocimientos aunque no influye en el resultado final de nuestra propuesta. Para mayor detalle sobre los diferentes procedimientos de instalación, configuración y puesta a punto del sistema véase [4][15][63][88][146].

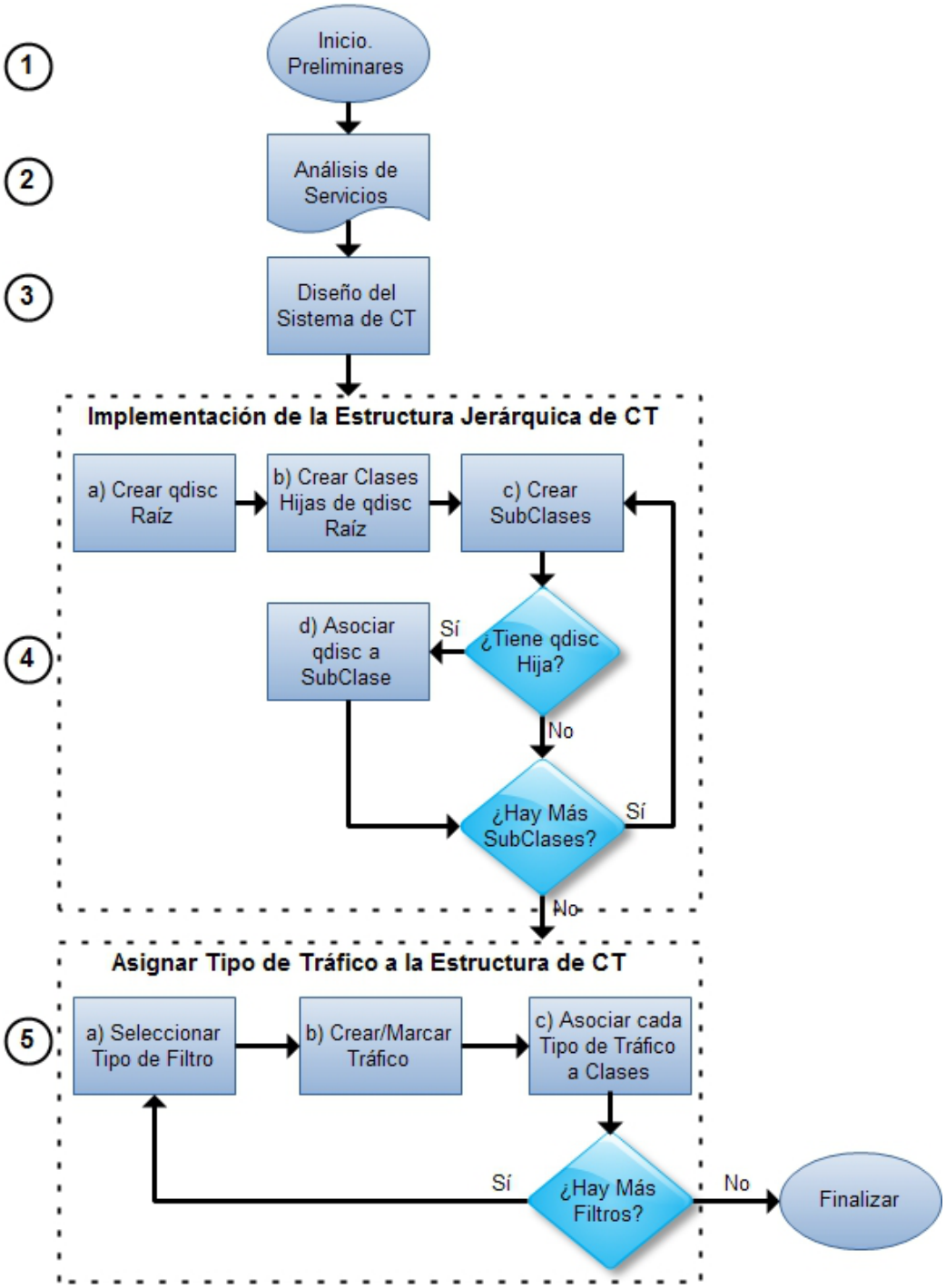



Figura 2.9: Construcción de un Sistema de CT.

**Etapa 2. Análisis de Servicios.**

Como su nombre indica, en esta etapa se analizan los diferentes servicios que se pretenden cubrir con el sistema de CT en la organización. Esta etapa estudia la organización en sí con sus funcionalidades, la necesidad de instalar un sistema de CT, se identifican los tipos de tráfico utilizados y los recursos de networking disponibles.

Uno de los aspectos clave en esta etapa es la identificación de los tipos de tráfico que son utilizados en la organización en su funcionamiento diario y que necesitan ser diferenciados. Obviamente, las posibilidades de tipos de tráfico que se pueden crear para una organización pueden ser muy numerosas y en combinación con grupos de usuarios diferenciados las posibilidades crecen dando suficiente flexibilidad como para identificar tipos de tráfico en todos los niveles TCP (ver Figura 2.2).

Ante esta situación, el administrador de red debe poder clasificar el tráfico y analizar la asignación de los recursos con la prioridad necesaria para evitar los problemas mencionados teniendo en cuenta el ancho de banda disponible en la organización[5].

**Etapa 3. Diseño del Sistema de CT.**

En esta etapa, el administrador de red debe identificar las características y el comportamiento que tendrá la estructura jerárquica que soporte el control de tráfico que necesita la organización. Para ello, debe crear el árbol de clases y las disciplinas de colas a utilizar definiendo las prioridades para todos los

[5]Diferentes estudios sobre QoS indican que el aumento del ancho de banda no es una solución al problema [6][57][147][154] y que es necesario implementar mecanismos de QoS.

tipos de tráfico identificados en la etapa anterior. Al finalizar esta etapa quedará definido el comportamiento que tendrá la estructura jerárquica en forma de árbol de QoS para la organización. Además se definen los tipos de tráfico y su relación con la estructura jerárquica de CT.

Es importante mencionar que en las etapas de análisis y diseño del sistema no se hacen las implementaciones físicas en el SO sino la estructura ideal de comportamiento a modo *borrador*. Luego, en las próximas etapas se llevan a cabo las implementaciones prácticas de lo planificado, es decir, la ejecución real de los comandos en el SO.

**Etapa 4. Implementación de la Estructura Jerárquica de CT.**

En esta etapa se crea la estructura que soporte las necesidades de comportamiento de la red. Para ello, primero creamos la *qdisc raíz* asociada al dispositivo de red y la/s clase/s que dependen de la qdisc raíz (ver Figura 2.9 procesos *a* y *b*).

Para continuar realizamos un proceso iterativo con el tercer nivel de la jerarquía, como se observa en los procesos *c* y *d* de la Figura 2.9. Con estos procesos creamos las subclases que modelarán el comportamiento del tráfico identificado. Al finalizar este proceso la estructura jerárquica diseñada en la etapa anterior estará implementada y modelará el comportamiento de la red que se necesita en la organización.

**Etapa 5. Asignar Tipos de Tráfico a la Estructura de CT.**

Hasta este punto hemos creado la estructura jerárquica en forma de árbol capaz de soportar el comportamiento del tráfico que se necesita en la organi-

zación. Sin embargo, dicha estructura aún no es capaz de priorizar el tráfico. Para completar el proceso, en esta etapa, es necesario utilizar los filtros para identificar los paquetes de manera que puedan asociarse a las clases correspondientes. Para ello, inicialmente se selecciona el filtro a utilizar (proceso *a*), dependiendo del filtro y a partir de ciertas condiciones se identifica y marca el tipo de tráfico particular (proceso *b*). Luego, con la marca hecha, se asocia el tipo de tráfico a una de las clases de la estructura jerárquica creada en la etapa previa como se observa en el proceso *c*. Este proceso se repite hasta que se hayan incluido en el sistema de CT todos los tipos de tráfico identificados en la etapa 2.

Con el objeto de revisar los conceptos de implementación del sistema de CT, en el ***Anexo A*** se muestra un ejemplo ilustrativo breve de su uso en una organización. En dicho anexo se muestra la factibilidad técnica para la construcción de un sistema de CT según las necesidades especificas de una organización y se siguen las etapas mostradas anteriormente.

## Capítulo 3

# Toma de Decisión, QoS y Análisis de Decisión

Como hemos visto en la Sección 2.3.3, para desarrollar un proceso de QoS podemos construir un sistema de CT que consta de diferentes etapas como se muestran en la Figura 2.9. Específicamente, la etapa de *Análisis* en la construcción del sistema de CT (etapa 2) sigue un esquema similar a un proceso de Análisis de Decisión (AD) en problemas de toma de decisión, donde antes de tomar una decisión se analizan las distintas alternativas del problema. Así, esta etapa podría modelarse mediante un proceso de AD donde se sigue un conjunto de fases como son: definición de un marco de trabajo (decisores o expertos que intervienen en el proceso, contexto de evaluación, identificación de los elementos a evaluar, es decir, tipos de tráfico de networking utilizados en la organización), recopilación de la información necesaria y finalmente, obtención de una valoración de los elementos evaluados.

Por lo tanto, el escenario de aplicación de esta memoria de investigación centra su objetivo en un proceso QoS en networking respecto a la asignación de diferentes prioridades para diferentes tipos de tráfico modelado a través

de un proceso de AD basado en conocimiento experto.

Así, la propuesta presentada en esta memoria de investigación está basada en modelos de análisis de decisión y su relación con los procesos de control de tráfico en networking. Para presentar esta relación, inicialmente, describiremos los problemas de toma de decisión, sus características, estructura y clasificación según la teoría de decisión. Luego, describiremos brevemente un modelo de resolución de un problema de toma de decisión, así como las fases que pertenecen al proceso de análisis de decisión en las que se basará nuestro modelo de QoS en networking.

## 3.1. Toma de Decisiones

En un sentido amplio, el proceso de Toma de Decisión (TD) en diversas actividades humanas consiste en elegir la/s mejor/es opción/es o alternativa/s entre un conjunto de alternativas posibles en pos de alcanzar un/os objetivo/s que satisfaga/n la resolución del problema planteado. De esta manera, debemos decidir qué hacer o qué alternativa tomar en función del entorno en el que nos encontramos, por lo tanto, las alternativas que se nos plantean tienen diversas consecuencias en el resultado final alcanzado, provocando en ocasiones, la aparición de incertidumbre en las mismas.

A veces el proceso de resolución de un problema de decisión es muy sencillo y puede realizarse mediante el uso de un método algorítmico, estas situaciones son llamadas situaciones de problemas *bien estructurados*. Sin embargo, muchos problemas de decisión llamados *mal estructurados* [37] no se pueden resolver de esta manera porque las decisiones pueden estar relacio-

nadas con los cambios del entorno y la existencia de vaguedad e incertidumbre en el marco de trabajo de la decisión [192].

La teoría clásica de la decisión ofrece modelos probabilísticos para gestionar la incertidumbre en los problemas de decisión, pero en muchos de ellos, es fácil observar que algunos de sus aspectos tienen un carácter no probabilístico, ya que están relacionados con la imprecisión y la vaguedad propia de la información con la que tratan [114].

Así, un proceso de Toma de Decisiones, intenta ayudarnos a tomar decisiones difíciles y complejas desarrollando métodos y/o modelos que permitan representar fielmente cada problema y analizar las distintas alternativas con criterios objetivos. Dichos procesos de TD han sido utilizados en diversas disciplinas clásicas como Economía, Matemática, Inteligencia Artificial, etc. [61]. Además, partiendo de teorías y modelos, con la idea de estructurar de una forma lógica el proceso de TD, se ha facilitado la tarea a los individuos encargados de llevarlo a cabo en diversas áreas de aplicación [115] tales como, aplicaciones industriales [31][157], servicios de internet [28][110][135], gestión de recursos humanos [45][46][47], proceso de evaluación lingüística [109][111][112], evaluación de riesgos [102][159], entre otras.

A modo de generalización, los problemas de toma de decisión presentan los siguientes elementos básicos [35]:

1. Uno o varios objetivos por alcanzar.

2. Un conjunto de acciones a tomar o alternativas posibles, $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$, para alcanzar dichos objetivos. La consecuencia de tomar una de estas acciones depende de un estado de la naturaleza. Usualmente la dificultad en la decisión está en el hecho de que no se conoce

qué alternativa es más adecuada.

3. Un conjunto de factores o estados de la naturaleza, $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_m\}$, que definen el contexto en el que se plantea el problema de decisión.

4. Un conjunto de valores de utilidad o consecuencias de acciones. Es el costo asociado a tomar una acción $x_j$ cuando los estados de la naturaleza son $\theta_i$ respectivamente.

Dependiendo de las características de los elementos del problema de decisión, estos podrán clasificarse atendiendo a distintos puntos de vista. Por otro lado, el tipo de información que define el marco del problema y su modelado influirán también en el modelo de resolución del problema de decisión.

Ante la gran variedad de situaciones o problemas de decisión que se pueden presentar en la vida real, y con motivo de identificar todos los aspectos y características importantes para esta memoria de investigación, en las siguientes subsecciones revisamos brevemente la clasificación de los problemas de TD en función de la Teoría de la Decisión. Posteriormente, revisaremos las características del modelado de preferencias en TD haciendo una distinción entre las estructuras que se utilizan para expresar y representar dichas preferencias. Por último mostraremos las fases del proceso de resolución de problemas en TD.

### 3.1.1. Clasificación de Problemas de Toma de Decisión

Como hemos mencionado, las personas y organizaciones se encuentran cotidianamente ante la necesidad de resolver problemas comunes. En términos formales, la teoría de la decisión se ocupa de analizar cómo un decisor

elige una acción (entre un conjunto de acciones posibles) que lo conduce al mejor resultado dadas sus preferencias [8]. Para proceder al análisis de la decisión es preciso identificar previamente un conjunto de opciones posibles desde la perspectiva de quien toma la decisión y un conjunto de consecuencias de cada una de las opciones. Estas consecuencias se pueden anticipar y ordenar según las preferencias del individuo suponiendo que el individuo elegirá aquella opción que más prefiera.

Una clasificación primaria del panorama de la teoría de la decisión se muestra resumida en la Figura 3.1.

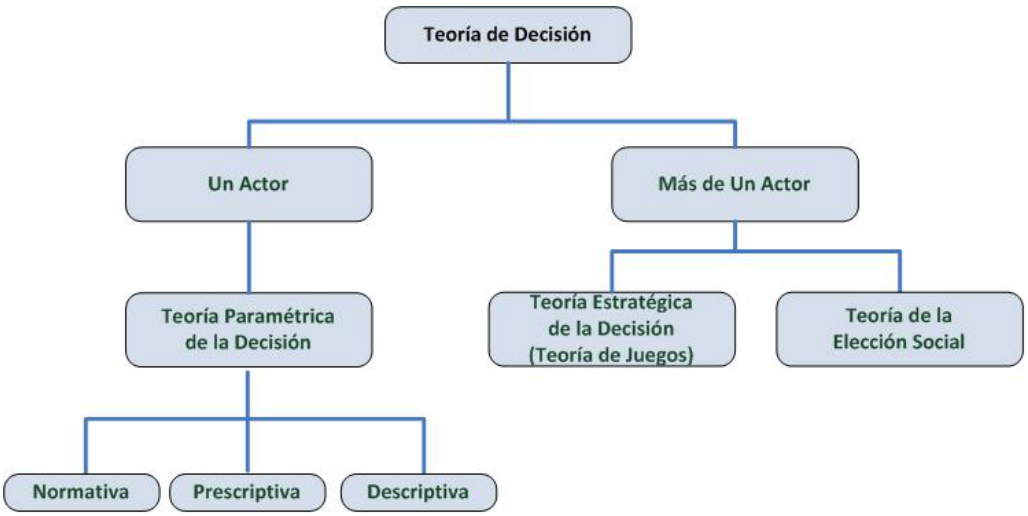



Figura 3.1: Teoría de la Decisión.

Una decisión puede ser paramétrica (si el contexto se considera dado) o estratégica (si las decisiones de los actores son interdependientes, de forma que nuestra decisión dependa de lo que hagan los demás). La teoría paramétrica de la decisión aborda la naturaleza formal de las decisiones y analiza criterios informativos a nivel individual. Dicha naturaleza formal se puede tratar de manera normativa, prescriptiva o descriptiva [10]. La teoría normativa indica

qué decisiones debe tomar alguien que no sufre nunca incoherencias lógicas y que es capaz de optimizar la búsqueda de información. La teoría prescriptiva indica cómo pueden elegir bien los individuos dadas sus limitaciones cognitivas e informativas. La teoría descriptiva de la decisión estudia la manera en cómo deciden las personas. En cambio, la teoría de juegos analiza cómo las decisiones individuales se ven influidas por las decisiones de otros y por el contexto [13]. Por último, la teoría de la elección social estudia y propone criterios para saber cuál sería su preferencia colectiva dadas las elecciones de preferencias individuales [2].

Por otro lado, los problemas de decisión se puede clasificar de acuerdo a diferentes características inherentes a los mismos. En la figura 3.2 se observa un resumen de esta clasificación que describiremos a continuación.

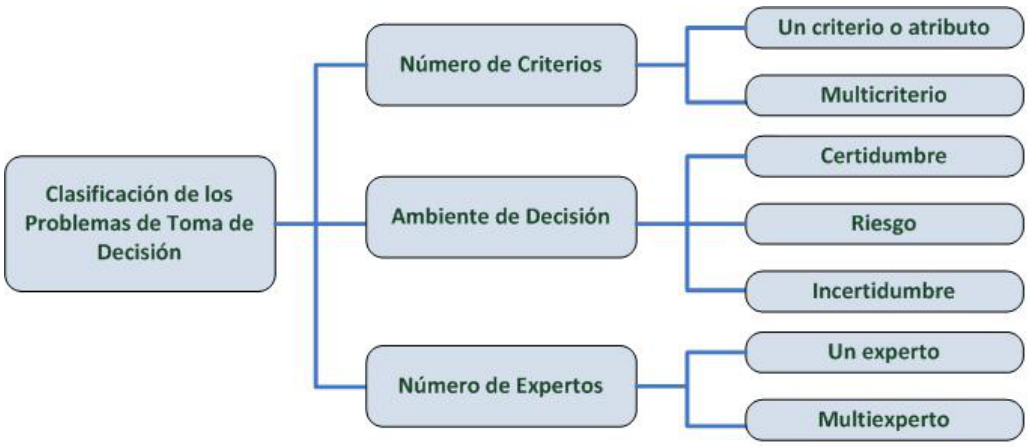



Figura 3.2: Clasificación de los Problemas de Toma de Decisión

1. **Según el Número de Criterios o Atributos** [59][61][104][151].

   **Problemas con un sólo criterio o atributo.** En los problemas de decisión de un único criterio, cada alternativa es caracterizada por

un único valor. Sea $X = \{x_1, x_2, ..x_n\}$ el conjunto de alternativas del problema. Una forma de representación de la información del problema se muestra en la Tabla 3.1.

| Alternativas | Valoración |
|---|---|
| $x_1$ | $y_1$ |
| ... | ... |
| $x_n$ | $y_n$ |

Tabla 3.1: Esquema General de un Problema de TD con un Único Criterio.

Cada entrada $y_i$ de la tabla indica la valoración de la alternativa $x_i$. Según el contexto de definición del problema, cada $y_i$ estará valorado en un dominio de expresión (numérico, lingüístico, etc.).

**Problemas multi-criterio o multi-atributo.** Los problemas que tienen en cuenta más de un criterio para la evaluación de cada alternativa se denominan problemas de Toma de Decisión Multi-Criterio (TDMC), donde el número de criterios es finito. Sean $X = \{x_1, x_2, ..x_n\}$ el conjunto de alternativas y $C = \{c_1, c_2, ..c_m\}$ el conjunto de criterios que caracterizan una situación de decisión determinada. Entonces, una forma de representación de la información del problema puede expresarse mediante la Tabla 3.2.

| Alternativas | Valoración | | | |
|---|---|---|---|---|
| $x_i$ | $c_1$ | $c_2$ | ... | $c_m$ |
| $x_1$ | $y_{11}$ | $y_{12}$ | ... | $y_{1m}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| $x_n$ | $y_{n1}$ | $y_{n2}$ | ... | $y_{nm}$ |

Tabla 3.2: Esquema General de un Problema de TDMC.

Cada entrada de la tabla $y_{ij}$ indica la preferencia de la alternativa

$x_i$ respecto del criterio $c_j$ . Según el contexto de definición del problema, cada $y_{ij}$ podrá estar valorado en un dominio de expresión de preferencias determinado (por ejemplo: numérico, lingüístico, intervalar).

2. **Según el Ambiente de Decisión.**

   Esta clasificación está definida por el contexto donde se lleva a cabo el proceso de decisión [58][91].

   **Ambiente de certidumbre.** Cuando son conocidos con exactitud todos los elementos y/o factores que intervienen en el problema. Esta situación permite asignar valores precisos a cada una de las alternativas presentes en el problema.

   **Ambiente de riesgo.** Cuando alguno de los elementos o factores que intervienen están sujetos a las leyes del azar. En estos casos estos problemas son resueltos utilizando la Teoría de la Probabilidad.

   **Ambiente de incertidumbre.** Cuando la información disponible sobre las distintas alternativas puede ser incompleta, vaga o imprecisa, lo que implica que la utilidad asignada a cada alternativa tenga que ser valorada de forma aproximada, estos problemas pueden ser resueltos utilizando la Teoría de Conjuntos Difusos [181][191]. Este es el ámbito que más se aproxima a las decisiones de la vida real y del comportamiento humano, ya que la imprecisión es inherente a los individuos.

3. **Según el Número de Expertos.**

   Es la clasificación de los problemas de toma de decisión que hace referencia al número de expertos o fuentes de información que toman parte en el proceso [32][94]. Un proceso de toma de decisión en el que

participan varios expertos es más complejo que cuando se realiza de forma individual, sin embargo, el hecho de que intervengan varios expertos con puntos de vista diferentes puede ofrecer una solución más satisfactoria al problema.

**Problemas de TD unipersonales o individuales.** Las decisiones son tomadas por un sólo experto. Cada alternativa es valorada por un único experto y la forma de representación se observa en la Tabla 3.3. Sea $X = \{x_1, x_2, ..x_n\}$ el conjunto de alternativas que son valoradas por el experto $e$.

| Alternativas | Experto $e$ |
|---|---|
| $x_1$ | $y_1$ |
| ... | ... |
| $x_n$ | $y_n$ |

Tabla 3.3: Esquema General de un Problema de TD con un Único Experto.

Cada entrada $y_i$ de la tabla indica la preferencia dada por el experto $e$ sobre la alternativa $x_i$ . Según el contexto de definición del problema, cada entrada $y_i$ podrá estar valorada en un dominio de expresión diferente.

**Problemas de TD multiexperto (TDME).** Las decisiones son tomadas en conjunto por un grupo de expertos que intentan alcanzar una solución en común al problema. Sean $X = \{x_1, x_2, ..x_n\}$ y $E = \{e_1, e_2, ..e_m\}$ el conjunto de alternativas y el conjunto de expertos que valoran cada alternativa que caracteriza una situación de decisión determinada. Entonces, una forma de representación de la información del problema puede verse en la Tabla 3.4.

Cada entrada $y_{ij}$ de la tabla indica la preferencia del experto $e_j$

| Alternativas | Expertos | | | |
|---|---|---|---|---|
| $x_i$ | $e_1$ | $e_2$ | ... | $e_m$ |
| $x_1$ | $y_{11}$ | $y_{12}$ | ... | $y_{1m}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| $x_n$ | $y_{n1}$ | $y_{n2}$ | ... | $y_{nm}$ |

Tabla 3.4: Esquema General de un Problema de TDME.

sobre la alternativa $x_i$.

Existe cierta similitud entre los problemas de TDMC y los problemas de TDME. En ambos casos, existen múltiples órdenes de preferencia sobre las alternativas y es necesario integrarlos en un único orden global de preferencia. La diferencia consiste en que en los problemas de TDME los órdenes de preferencia representan la importancia de las alternativas según cada persona y en los problemas de TDMC los órdenes representan la importancia de cada alternativa respecto a cada criterio.

### 3.1.2. Modelado de Preferencias en Toma de Decisión

En nuestra propuesta, el modelado de preferencias juega un papel fundamental ya que se utiliza para que los expertos, en base a su conocimiento, experiencias y creencias, expresen sus valoraciones sobre el conjunto de alternativas y establezcan una preferencia sobre la idoneidad de cada una ellas como solución al problema. La naturaleza de las alternativas, la formación y el conocimiento del experto, influirán en el modelado de la información en cada problema. Para hacer una breve revisión sobre el modelado de preferencias [16][59][141], vamos a considerar dos puntos de vista claramente diferenciados pero igualmente importantes, como son el dominio de expresión de la

información y la estructura de representación de preferencias.

1. **El dominio de expresión de la información.**

   En problemas de decisión entendemos por dominio de expresión de preferencias al conjunto de valores utilizado por los expertos para emitir sus preferencias. La elección de un dominio de información para expresar las preferencias puede deberse a varios motivos:

   **a)** ***Naturaleza cuantitativa o cualitativa de la información.*** La naturaleza propia del atributo puede condicionar el dominio utilizado para su valoración. Atributos de naturaleza cuantitativa se adecúan mejor a valoraciones de tipo numéricas, sin embargo, cuando los atributos son de naturaleza cualitativa, el uso de valoraciones como palabras o términos lingüísticos ( *"bueno", "malo", "mejor", ...*) suele ser más apropiado. Un ejemplo de ello son sensaciones o percepciones subjetivas de un determinado atributo que forma parte del problema tratado.

   **b)** ***Pertenencia de los expertos a diferentes áreas de conocimiento.*** En grupos heterogéneos de expertos con diferentes y múltiples grados de conocimiento, frecuentemente no proceden del mismo campo de conocimiento, poseen diferente información, o no tienen el mismo grado de experiencia. Además, pueden condicionar el dominio de expresión usado. Por lo tanto, siempre que fuera posible, cada experto tendería a utilizar un dominio de información que le resulte cercano al tipo de información con el que esté acostumbrado a trabajar en su respectiva área de trabajo. Así, expertos pertenecientes a áreas técnicas se sentirán cómodos utilizando valoraciones numéricas. Sin embargo, aquellos pertenecientes a áreas sociales pueden preferir utilizar otro tipo de valoraciones no numéricas como las lingüísticas.

**c)** ***Expertos con diferente grado de conocimiento sobre el problema.*** El modelado de la información debe permitir que los expertos puedan emitir sus valoraciones de la manera más precisa posible, de forma que éstas se adapten a su nivel de conocimiento. La experiencia de los expertos en la resolución de problemas similares puede implicar que unos expertos opten por elegir dominios de expresión precisos como valores numéricos exactos (0, 1, 100, 250, ..., n) [53] frente a otros expertos con menos experiencia y que se sientan más cómodos utilizando dominios más flexibles como intervalares [84] o variables lingüísticas [76][182][183][184]. Esto tiene como consecuencia un aumento de la garantía de éxito de la decisión adoptada por los mismos [53].

En esta memoria de investigación, nos centraremos en el uso del dominio lingüístico, ya que es el que mejor se adecúa para el desarrollo de nuestra propuesta. En ella, los expertos pueden tener diferente grado de conocimiento del problema y considerando que expresarán información subjetiva, la modelaremos de manera cualitativa a través de dominios lingüísticos.

2. **La estructura de representación de preferencias.**

   Conocidos los dominios de expresión, vamos a revisar qué tipos de estructuras pueden usar los expertos para representar sus preferencias en los problemas de decisión. La importancia de este concepto se debe a que las opiniones de los expertos se almacenarán en una estructura de representación sobre la que se operará posteriormente y suelen ser las siguientes:

   **a)** ***Órdenes de Preferencia.*** En este formato de representación de preferencias se establece un ranking u orden de alternativas que representa la idoneidad de cada alternativa como solución al problema

de decisión según el punto de vista de cada experto. Las preferencias de un experto $e_i \in E$ sobre un conjunto de alternativas $X$, se describen mediante un orden de preferencias individual, $O^i = \{o^i(1), ...o^i(n)\}$ dónde $O^i(\cdot)$ es una función de permutación sobre el conjunto de índices $\{1, ..., n\}$ para dicho experto. De esta forma, un experto, de acuerdo a su punto de vista, proporciona un vector de alternativas ordenado de mejor a peor. Para todo orden de preferencia $O^i$ supondremos, sin pérdida de generalidad, que cuanto menor es la posición de una alternativa en dicho orden, mejor satisface dicha alternativa el criterio del experto que proporciona dicho orden y viceversa [129][148].

**b)** ***Vectores de Preferencia.*** En este caso, las preferencias de un experto, $e_i \in E$, sobre un conjunto de posibles alternativas $X$, se describen mediante un vector de $m$ valores de preferencia en un dominio $D$, $U^i = \{u^i_1, ...u^i_m\}$ , $u^i_j \in D$ [36], siendo $D$ el dominio de expresión de la información utilizado por dicho experto.

En este caso, el experto asocia a cada alternativa un valor de preferencia que representa el grado de cumplimiento desde su punto de vista por parte de dicha alternativa. Para cada conjunto de valores de preferencia, supondremos, sin pérdida de generalidad, que cuanto mayor es la valoración de una alternativa, mejor satisface dicha alternativa el objetivo del experto [106]. En esta memoria los valores emitidos por los expertos estarán representados por un vector de preferencias donde podrán estar definidos en diferentes dominios de expresión, en función de las alternativas a evaluar y del grado de conocimiento o experiencia de cada uno de ellos.

**c)** ***Relaciones de Preferencia.*** En teoría matemática clásica, las preferencias sobre un conjunto de alternativas se pueden modelar a

través de una relación binaria $R$ definida como sigue:

$$x_i \, R \, x_j \Leftrightarrow \text{“}x_i \, no \, es \, peor \, que \, x_j\text{”}$$

Esta definición considera una relación binaria como una relación de preferencia débil, e implica que dicha relación $R$ es reflexiva. Con esta definición, es natural asociar un número real, llamado valoración y denotado por $R(x_i, x_j) \in D$, el cual representa el grado de verdad de la afirmación “$x_i \, no \, es \, peor \, que \, x_j$”, o grado de preferencia de la alternativa $x_i$ sobre la alternativa $x_j$. Cuando el conjunto de alternativas es finito, podemos asociar una matriz $P_R$ a la relación $R$, tomando como elemento $ij$-ésimo el valor $R(x_i, x_j)$ [36][94][130][148].

### 3.1.3. Esquema Básico de Resolución de Problemas de Toma de Decisión

La teoría de decisión tiene muchos y diferentes ámbitos de aplicación para diversos tipos de problemas, sin embargo se propone un esquema básico de resolución [37] [140] que consta de dos fases (ver Figura 3.3): *(1) agregación y (2) explotación*, que describiremos brevemente a continuación.

1. **Fase de Agregación.** Combina las preferencias individuales para obtener una valoración global o colectiva que refleje las preferencias aportadas por el conjunto de expertos para cada alternativa. Esta combinación de preferencias se realiza utilizando operadores de agregación cuya función principal es transformar todas las preferencias individuales en una única preferencia colectiva. Existen en la literatura numerosos es-

tudios de agregación [9][165][169][171][176].

2. **Fase de Explotación.** En esta fase las valoraciones globales obtenidas en la fase anterior deben ser ordenadas para obtener el conjunto solución de alternativas. La explotación ordena los valores de preferencia colectivos según un criterio dado para obtener la/s mejor/es alternativa/s a través de un proceso de selección. Para realizar esto es necesario definir un criterio de selección que permita establecer un orden de mérito entre el conjunto de alternativas al problema. Se utilizan funciones de selección que permiten medir la intensidad del grado de selección en cada alternativa. Aquellas alternativas con mayor intensidad son las que constituyen el conjunto de alternativas solución al problema de decisión [75][130][139].

Figura 3.3: Resolución de los Problemas de Toma de Decisión.

Como hemos mencionado, la teoría de decisión ayuda a los individuos a seleccionar la mejor alternativa, entre varias, para resolver un problema de decisión complejo. Esto implica un proceso de análisis objetivo y de estudio de las mismas a través de métodos y modelos que permitan representar fielmente cada problema [97]. Debido a que en un problema de decisión existen muchos factores externos, emocionales, subjetivos, etc., que afectan a su solución,

no todo problema de decisión se resuelve siempre a través de un proceso completamente racional [1][7]. Por lo tanto, la solución puede variar si las condiciones en las que se presenta el problema cambian.

El esquema general de resolución de un problema de toma de decisión (ver Figura 3.3) puede completarse y extenderse a 8 fases, como se muestra en la Figura 3.4 [37]. El conjunto formado por las 7 primeras fases son totalmente objetivas y racionales y se denomina Proceso de Análisis de Decisión. Este proceso es utilizado para ayudar a los decisores a poder tomar decisiones consistentes en problemas de TD.

La última fase del proceso no está basada necesariamente en factores racionales, ya que pueden influir factores subjetivos, emocionales, etc.

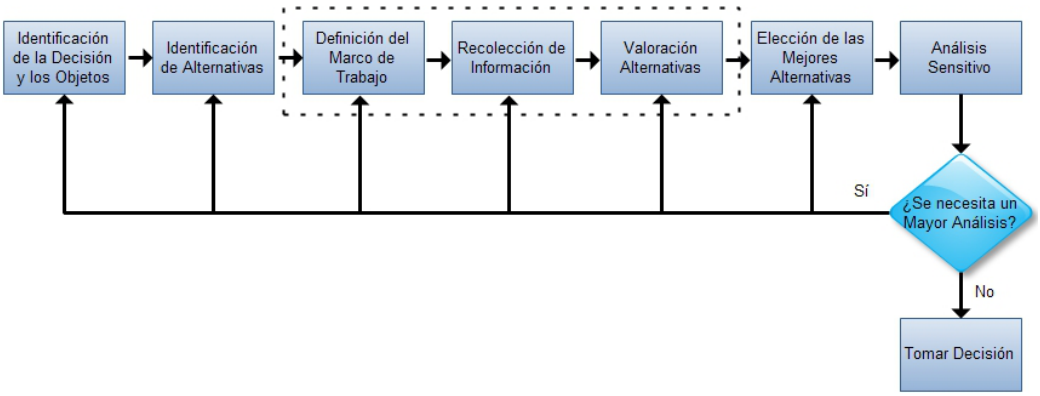



Figura 3.4: Esquema de un Proceso de Toma de Decisión.

1. *Identificación de la Decisión y los Objetos.*

2. *Identificación de las Alternativas.*

3. *Definición del Marco de Trabajo.* Corresponde a la estructura del problema y los medios con que la información es modelada.

4. *Recolección de Información.* Los expertos que participan del proceso establecen sus preferencias.

5. *Valoración de Alternativas.* Esta fase también es también conocida en el esquema de decisión clásico como "fase de agregación". Para hacer esto, las preferencias individuales de los expertos son agregadas para obtener un vector de preferencia colectivo para cada alternativa.

6. *Elección de la Mejores Alternativas.* Esta fase también es conocida en el esquema de decisión clásico como "fase de explotación". En ella se selecciona el conjunto solución de alternativas para el problema de decisión, aplicándole un grado de elección a los vectores colectivos de cada alternativa.

7. *Análisis Sensitivo.* Analiza si la información obtenida es suficientemente buena para tomar una decisión. Según el resultado de este análisis el proceso puede volver a las fases iniciales para realizar un análisis en profundidad del problema o tomar una decisión.

8. Tomar Decisión. La información obtenida del análisis de decisión puede ser utilizada para tomar una decisión consistente con el análisis realizado.

Como hemos mencionado anteriormente, la construcción del sistema de CT, específicamente la etapa de *análisis* que identifica los tipos de tráfico usados por la organización y la planificación para asignarle recursos a éstos, puede modelarse como un proceso de AD. Además, es importante remarcar que el proceso de asignación de QoS y construcción de la estructura jerárquica de CT es un proceso complejo y requiere del análisis de los tipos de tráfico

usados en la organización para luego diseñar la estructura que soporte la aplicación del sistema de CT.

Así, la etapa de *análisis* en la construcción del sistema de CT coincide con las fases principales del esquema básico de análisis de decisión en el que se apoya el modelo que proponemos en nuestra memoria de investigación. En la siguiente sección analizamos con mayor detalle la relación entre ambos.

## 3.2. Análisis de Decisión y QoS en Networking

El funcionamiento de Internet es, por naturaleza, descentralizado y está compuesto de múltiples dominios administrativos, donde definir el control sobre los recursos de networking consiste en tomar decisiones locales sobre su uso.

Así, esta memoria de investigación centra su estudio en ambientes corporativos y organizacionales heterogéneos, en cuanto a utilización de servicios de Internet permitiendo contar con un mecanismo que se adapte a cada empresa u organización. Para ello, como hemos visto en el Capítulo 2, existen diferentes modelos y estándares con diferentes funciones pero orientados a proponer distintas soluciones para resolver este problema. En la Sección 2.2 y 2.3 hemos revisado un conjunto de herramientas de CT que adicionan diferentes funcionalidades que pueden ser útiles para nuestros propósitos y específicamente, en la Sección 2.3.3, hemos generalizado el proceso de construcción de un sistema de CT para la organización basado en SWL.

Para llevar a cabo dicha construcción hemos propuesto una serie de etapas

que van desde la puesta a punto del sistema hasta la configuración avanzada de filtros. Pero antes de implementar la solución es necesario hacer un análisis de la organización, los objetivos y tipos de tráfico que vamos a considerar para hacer el diseño de la estructura del sistema de CT. En este sentido, las etapas de *análisis* y *diseño* en la construcción del sistema de CT pueden modelarse con un proceso de decisión y abstracción de alto nivel. En él, pretendemos asignar una mayor QoS a la red local de manera útil y flexible atendiendo al conocimiento experto.

Para llevar a cabo esta idea debe existir un proceso que sirva de enlace o integración entre la implementación del sistema de CT para QoS y el proceso de análisis de decisión.

En la Figura 3.5 mostramos la relación entre ambos procesos a través de flechas entre cada etapa. En la parte izquierda de la Figura 3.5 se encuentra el proceso de construcción del sistema de CT y en la parte derecha el proceso de decisión.

Como hemos mencionado, el proceso de proveer QoS con CT para la priorización de los diferentes servicios, aplicaciones y usuarios de red, puede resultar una tarea compleja. Por lo que, con este proceso de integración, se pretende contar con un método que permita abstraer la complejidad del CT respecto de las fases del modelo de análisis de decisión presentado en esta memoria (ver fase de Abstracción en la Figura 3.5).

Además, con el objeto de mejorar el proceso de decisión y debido a las propias características del problema, el modelo de análisis de decisión propuesto debe permitir la participación de múltiples expertos y la capacidad de manejar la información con incertidumbre propia de esta situación. Así,

su desarrollo estará basado en un esquema básico de decisión [76][109] que puede observarse en la Figura 3.6.

El objetivo que persigue el modelo básico es ofrecer un marco de análisis donde cada experto puede expresar sus valoraciones en un dominio de expresión que maneja la información con incertidumbre del problema.

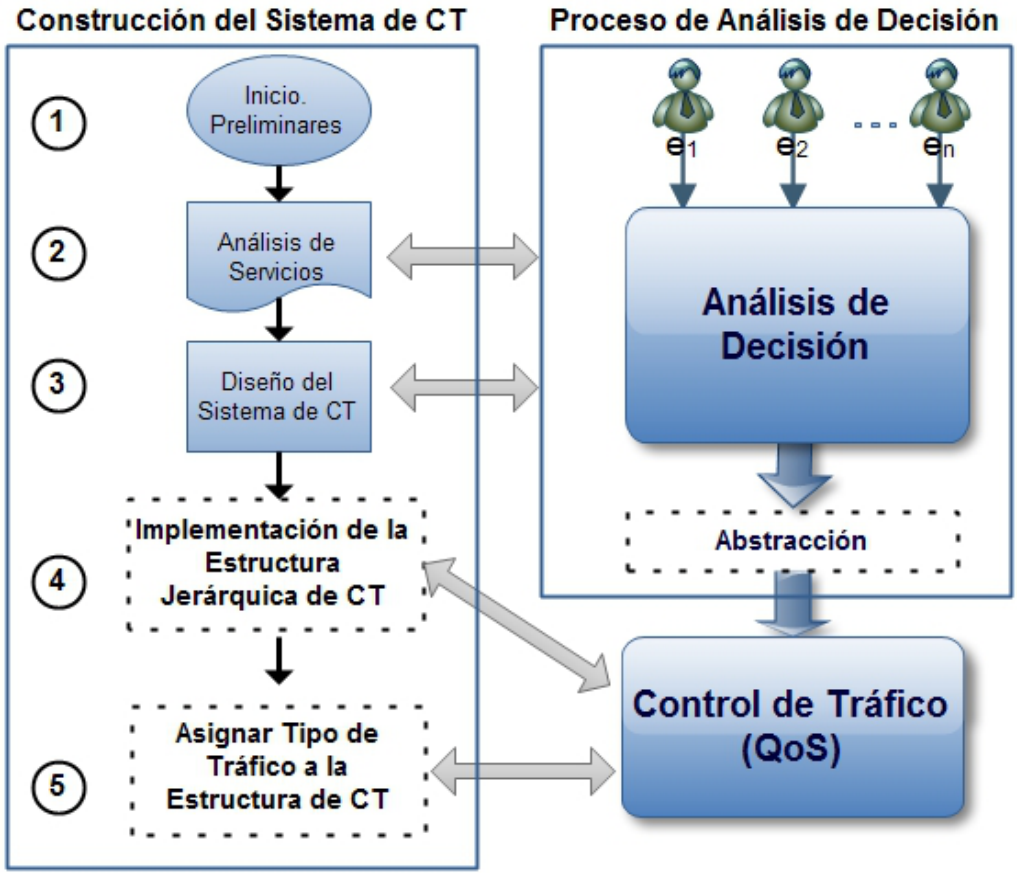



Figura 3.5: Esquema de Abstracción y Relación entre CT y el Proceso de AD.

Las fases del modelo básico son las siguientes:

**1. Marco de Trabajo.** Aquí se define el contexto en que los expertos ex-

presan sus preferencias acerca de los objetos o alternativas analizadas. Además, en el modelo básico se identifican los objetos de análisis, sus características y los expertos que participarán del proceso de decisión y no se considera el modelado de la información que utilizan los expertos para expresar sus valoraciones.

A continuación definimos las características y terminologías básicas que usa el modelo:

Sea $E = \{e_1, ..., e_n\}$ el conjunto de expertos que participarán del proceso de análisis de decisión.

Sea $X = \{x_1, ..., x_m\}$ el conjunto de alternativas u objetos.

Sea $F = \{f_1, ..., f_h\}$ un conjunto de características de los objetos.

**2. Recopilación de la Información.** Los expertos expresan sus conocimientos acerca de las alternativas, mediante vectores de preferencia. Cada experto $e_i$, con $i = 1 \ldots n$, proporciona sus preferencias para cada una de las alternativas a través de vectores de preferencia:

Sea, $U_i = \{u^i_{11}, .., u^i_{1h}, u^i_{21}, .., u^i_{2h}, ..., u^i_{m1}, ..., u^i_{mh}\}$ dónde, $u^i_{jk}$, con $j = 1 \ldots m$ y $k = 1 \ldots h$, es la valoración de la característica $f_k$ de la alternativa $x_j$ por el experto $e_i$.

**3. Valoración de Alternativas.** En esta fase los vectores de preferencia $U_i$ proporcionados por los expertos serán utilizados para obtener una valoración global de las alternativas. Para ello, se seleccionan los operadores de agregación que podrían utilizarse, los que dependen del proceso de análisis de decisión. El proceso de agregación consiste inicialmente en dos etapas, aunque puede variar dependiendo del problema, como veremos luego en el modelo que presentamos en esta memoria de investigación.

- *Evaluación colectiva para cada característica:* En primer lugar se calcula un valor colectivo, $u_{jk}$ , para cada característica $f_k$ sobre la alternativa $x_j$ usando el operador de agregación, $AO_1$, sobre las valoraciones proporcionadas por los expertos, $u^i_{jk}$: $u_{jk} = AO_1(u^1_{jk}, ..., u^n_{jk})$
- *Evaluación colectiva para cada objeto:* En esta etapa se obtiene una valoración global para cada objeto, $u_j$, de acuerdo a las preferencias de todos los expertos. Aquí se agregan los valores de preferencias colectivos de cada característica de los objetos usando un operador de agregación $AO_2$: $u_j = AO_2(u_{j1}, ..., u_{jh})$

Nota: los operadores $AO_1$ y $AO_2$ son independientes el uno del otro.

**4. Análisis de Resultados.** En esta etapa, el vector de preferencias colectivo es ordenado de acuerdo a algún criterio determinado para obtener el conjunto solución compuesto de las mejores alternativas. También es llamada etapa de explotación.

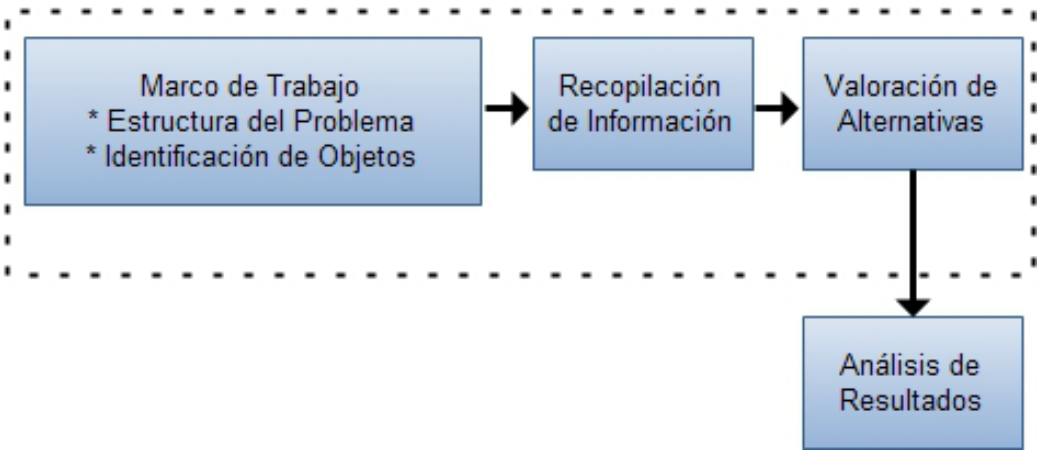



Figura 3.6: Esquema de Básico de Análisis de Decisión.

Dado que el objetivo de interés en esta memoria de investigación es presentar un modelo de QoS para networking basado en un proceso de análisis de decisión definido en un marco de evaluación flexible, en el que los distintos expertos pueden expresarse en el dominio lingüístico que mejor se adecúe a su grado de conocimiento y así dar un mejor soporte a la TD respecto a la QoS, en el siguiente capítulo se revisarán las herramientas necesarias para gestionar la incertidumbre propia del problema presentado en esta memoria de investigación a través de información lingüística.

## Capítulo 4

# Información Lingüística y Modelos Lingüísticos Computacionales

Como hemos mencionado en el Capítulo 3, la TD puede ser vista como un proceso que consta de diferentes fases, tales como la recopilación de información, análisis y selección; realizadas sobre la base de diferentes procesos mentales y de razonamiento que conducen a elegir una alternativa adecuada entre un conjunto de alternativas posibles para resolver un problema determinado [105][151]. Según la teoría de decisión, la clasificación de los problemas se debe principalmente a las características de los elementos que participan del proceso y al marco de trabajo para la TD.

En esta memoria de investigación nos centramos en los problemas de decisión donde pueden participar múltiples expertos para definir un esquema de control de tráfico para la organización. La participación de múltiples expertos con diferentes orientaciones, conocimiento estratégico, conocimiento técnico, experiencia, etc., introduce incertidumbre, vaguedad y subjetividad

en la información manejada, lo que nos plantea hablar de toma de decisiones bajo incertidumbre donde los expertos expresan sus preferencias sobre los distintos tipos de tráfico de networking. Esto implica que sea adecuado el uso de herramientas que faciliten la gestión y el modelado de este tipo de información incierta en los procesos de decisión, como son la Lógica Difusa y la Teoría de Conjuntos Difusos [98][181]. En este sentido, el Enfoque Lingüístico Difuso [182][183][184] proporciona una manera directa para representar la información incierta por medio de variables lingüísticas mejorando la fiabilidad y la flexibilidad de los modelos de decisión clásicos. Así, los expertos involucrados en las situaciones de decisión utilizan palabras del lenguaje natural, originando la Toma de Decisiones Lingüística (TDL) [72][76][113].

Sin embargo, para resolver los problemas de TD donde se utiliza información lingüística, TDL, se requiere realizar procesos de Computación con Palabras (CW). La CW realiza cálculos con palabras o frases definidos en el lenguaje natural en lugar de números. En ella se emulan los procesos cognitivos humanos para mejorar los procesos de resolución de problemas relacionados con la incertidumbre. Así, los procesos de CW se han aplicado como base de cálculo para la TDL [76], ya que proporcionan herramientas cercanas al razonamiento de los seres humanos en los procesos relacionados con la toma de decisiones mejorando la resolución de los problemas de toma de decisiones bajo incertidumbre.

Por lo tanto, dado que el objetivo de nuestra memoria de investigación es presentar un modelo QoS flexible que permita modelar la incertidumbre propia del problema mediante información lingüística, en este capítulo revisamos conceptos previos y antecedentes relacionados con información lingüística. Inicialmente, nos enfocamos en antecedentes y conceptos rela-

cionados a la Teoría de Conjuntos Difusos y el Enfoque Lingüístico Difuso. Finalmente, revisamos algunos Modelos Lingüísticos Computacionales para la Computación con Palabras poniendo énfasis en el Modelo Computacional Lingüístico 2-tupla, ya que es la base de representación y cálculo en nuestra propuesta.

## 4.1. Teoría de Conjuntos Difusos

La Teoría de los Conjuntos Difusos fue propuesta por Lofti Zadeh en el año 1965 [181] y su objetivo principal fue modelar aquellos problemas donde los enfoques clásicos resultaban insuficientes, no funcionales o poco operativos. Dicha teoría generaliza la noción clásica de conjunto e introdujo el concepto de "conjunto difuso" o "difusividad" de la información como aquel conjunto cuya frontera no es precisa. Los conjuntos difusos surgen como una nueva forma de representar la imprecisión y la incertidumbre [98][191] diferente al tratamiento tradicional llevado a cabo por la Teoría Clásica de Conjuntos y la Teoría de la Probabilidad.

A lo largo de más de cuatro décadas de existencia de la Teoría de Conjuntos Difusos, ha habido gran cantidad de investigaciones aplicadas en dos ramas principales [133]:

- Como una teoría matemática formal [87][124], ampliando conceptos e ideas de otras áreas de la matemática como el Álgebra, la Teoría de Grafos, la Topología, etc., al aplicar conceptos de la Teoría de Conjuntos Difusos a dichas áreas.
- Como una potente herramienta para tratar situaciones del mundo real

en las que aparece incertidumbre (imprecisión, vaguedad, inconsistencia, etc.). Debido a la generalidad de esta teoría, se adapta con facilidad a diferentes contextos y problemas: Teoría de Sistemas [23][132], Toma de Decisión [5][12][18], Bases de Datos [20][62][177][180], Recuperación de Información [19][85][123], Evaluación Sensorial [33][109][111][112], etc. En muchas ocasiones esto implica adaptar los conceptos originales de la Teoría de los Conjuntos Difusos a diferentes contextos en los que se esté trabajando.

En los siguientes apartados, hacemos una breve descripción de los conceptos básicos relacionados con la Teoría de Conjuntos Difusos que utilizamos en nuestra memoria de investigación.

### 4.1.1. Conjuntos Difusos y Funciones de Pertenencia

La noción de conjunto refleja la idea de agrupar objetos que cumplen una o varias propiedades que caracterizan a dicho conjunto. Una propiedad puede ser considerada como una función característica donde a cada elemento del universo de discurso $U$ se le asigna un valor en el conjunto $\{0, 1\}$, de forma que si el elemento pertenece al conjunto, es decir, cumple la propiedad se le asigna el valor 1 o en caso contrario el valor 0. Así, los conjuntos introducen una noción de dicotomía, es decir, una clasificación binaria en la que se acepta o rechaza la pertenencia de un objeto a una determinada categoría. La decisión de aceptar o rechazar dicha pertenencia se realiza mediante una función característica según las propiedades que posean los objetos del conjunto mencionado.

**Definición 1** *Sea $A$ un conjunto en el universo $U$, la función característica asociada a $A, A(u)$; $u \in U$ se define como:*

$$A(u) = \begin{cases} 1, & si\, u \in A \\ 0, & si\, u \notin A \end{cases}$$

La función $A : U \rightarrow \{0, 1\}$ induce una restricción, con un límite bien definido, sobre los objetos del universo $U$ que pueden ser asignados al conjunto $A$.

La teoría de conjuntos difusos se fundamenta en el concepto de conjunto difuso [181] que relaja la restricción anterior y admite valores intermedios en la función característica, que pasa a denominarse *función de pertenencia*. Esta relajación permite una interpretación más realista de ciertos contextos de trabajo. La mayoría de las categorías que describen los objetos del mundo real no tienen unos límites claros y bien definidos, por ejemplo, persona *alta*, *buen* sabor, coche *veloz*, etc. (las palabras en itálica identifican fuentes de imprecisión). Si un objeto pertenece a una categoría con un grado de pertenencia que puede ser expresado por un número real en el intervalo $[0, 1]$, cuanto más cercano a 1 sea el grado, indicaría mayor pertenencia a esa categoría determinada y cuanto más cercano a 0 indicaría menor pertenencia a dicha categoría.

Por lo tanto, un conjunto difuso puede definirse como una colección de objetos con valores de pertenencia entre 0 (exclusión total) y 1 (pertenencia total). Los valores de pertenencia expresan los grados con los que cada objeto es compatible con las propiedades o características distintivas de la colección. Formalmente podemos definir un conjunto difuso como sigue:

**Definición 2** *Un conjunto difuso $\tilde{A}$ sobre un dominio o universo de discurso $U$ está caracterizado por una función de pertenencia, $\mu_{\tilde{A}}$, que asocia a cada elemento $u \in U$, el grado de pertenencia a dicho conjunto en el intervalo $[0,1]$:*

$$\mu_{\tilde{A}} : U \rightarrow [0,1]$$

Así, un conjunto difuso $\tilde{A}$ sobre $U$ puede representarse como un conjunto de pares ordenados de un elemento genérico $u$, $u \in U$, y su grado de pertenencia, $\mu_{\tilde{A}}(u)$:

$$\tilde{A} = \{(u, \mu_{\tilde{A}}(u))/\ u \in U, \quad \mu_{\tilde{A}}(u) \in [0,1]\}$$

Claramente, un conjunto difuso es una generalización del concepto de conjunto, cuya función de pertenencia toma tan sólo dos valores {0,1}.

**Ejemplo 1** *Consideremos el concepto "Alumno Distinguido", en un contexto donde se mide su rendimiento académico general en una escala del $[1,100]$ definido en promedios de rendimiento según sus calificaciones. Evidentemente, si el alumno tiene un promedio de 15 no es un alumno distinguido y se le asignará un valor de cero a su grado de pertenencia al conjunto de alumnos distinguidos. Un alumno con un promedio superior a 90 puede considerarse un alumno distinguido y asignarle un valor 1 para expresar el grado de compatibilidad con el concepto. Por tanto, los promedios en el rango $[90,100]$ tienen un grado de pertenencia igual a 1 en el conjunto de alumnos distinguidos y los promedios en el rango $(80,90)$ tienen un grado de pertenencia creciente mayor a cero y menor a uno. La cuantificación de estos valores puede llevarse a cabo mediante una función de pertenencia $\mu_{\tilde{A}} : U \rightarrow [0,1]$ que caracteriza el conjunto difuso $\tilde{A}$ de alumnos distinguidos en el universo $U = [1,100]$.*

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \begin{cases} 0 & u \in [1, 80] \\ \frac{u-80}{10} & u \in (80, 90) \\ 1 & u \in [90, 100] \end{cases}$$

Los conjuntos difusos pueden definirse sobre universos de discurso finitos o infinitos usando distintas notaciones. Si un universo de discurso $U$ es discreto y finito con cardinalidad $n$, el conjunto difuso puede expresarse con un vector *n-dimensional* cuyos valores son los grados de pertenencia a los correspondientes elementos de $U$. A veces se utiliza notación sumatoria que nos permite enumerar sólo los elementos de $U$ con grados distintos de cero en el conjunto difuso. Por ejemplo, si $U = \{u_1, u_2, \ldots, u_n\}$, entonces un conjunto difuso $\tilde{A} = \{(a_i/u_i)|u_i \in U\}$, donde $a_i = \mu_{\tilde{A}}(u_i), i = 1, \ldots, n$, puede notarse por [98]:

$$\tilde{A} = a_1/u_1 + a_2/u_2 + \ldots + a_n/u_n = \sum_{i=1}^{n} a_i/u_i$$

Cuando el universo del discurso $u$ es continuo, para representar un conjunto difuso podemos usar la siguiente función:

$$\int_u a/u$$

donde $a = \mu_{\tilde{A}}(u)$ y la integral debería ser interpretada de la misma forma que la sumatoria en el universo del discurso finito.

### 4.1.2. Funciones de Pertenencia Típicas

Como hemos mencionado, un conjunto difuso puede representarse gráficamente como una función llamada *función de pertenencia*, donde el eje X corresponde al universo del discurso y el eje Y al grado de pertenencia en

el intervalo $[0, 1]$. Cualquier función $\mu_{\tilde{A}} : U \to [0, 1]$ describe una función de pertenencia asociada a un conjunto difuso $\tilde{A}$ y su definición exacta depende del concepto a definir, del contexto al que se refiera, de la aplicación, etc.

En general, es preferible usar funciones simples, debido a que simplifican muchos cálculos y no pierden exactitud, debido a que precisamente se está definiendo un concepto difuso [50].

Las gráficas que representan una función de pertenencia cumplen propiedades específicas y dependen del contexto de aplicación para elegir la más adecuada según sea el caso. Algunas de las funciones de pertenencia más utilizadas son las siguientes:

**Función de Pertenencia Trapezoidal.**

Definida por sus límites inferior $a$ y superior $c$, y los límites de su soporte, $b$ y $d$, inferior y superior respectivamente (ver Figura 4.1). Se representa con la siguiente función:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & si \quad (x \leq a) o (x \geq c) \\ (x-a)\,/\,(b-a) & si \quad x \in (a, b] \\ 1 & si \quad x \in (b, d] \\ (c-x)\,/\,(c-d) & si \quad x \in (d, c) \end{cases}$$

Algunos autores nombran a los soportes superior e inferior como b y c, por lo que cambia el orden de las variables de la ecuación, pero el concepto sigue siendo el mismo.

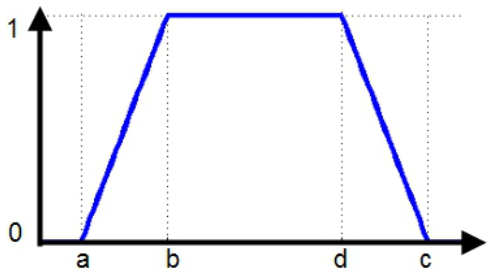



Figura 4.1: Función de Pertenencia Trapezoidal.

**Función de Pertenencia Triangular.**

Un caso particular de una función de pertenencia trapezoidal son las funciones de pertenencia triangulares donde los parámetros $b$ y $d$ son iguales, es decir, $b = d$. Por tanto, se representan por medio de una terna $(a, m, b)$. Está definida por sus límites inferior $a$ y superior $b$, y el valor modal $m$ (ver Figura 4.2), tal que $a < m < b$. Se representa con la siguiente función:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & si \quad x \leq a \\ (x-a)\,/\,(m-a) & si \quad x \in (a, m] \\ (b-x)\,/\,(b-m) & si \quad x \in (m, b) \\ 0 & si \quad x \geq b \end{cases}$$

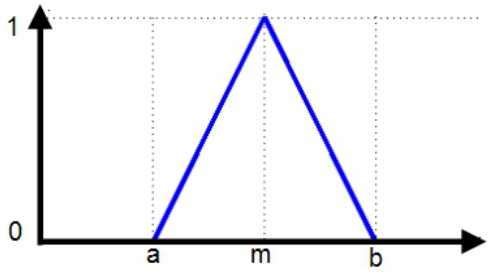



Figura 4.2: Función de Pertenencia Triangular.

**Función de Pertenencia Gaussiana.**

Es la típica campana de Gauss definida por su valor medio $m$ y el valor $k > 0$; cuando mayor es $k$ más estrecha es la campana (ver Figura 4.3). Se representa con la siguiente función:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \ e^{-k(x-m)^2}$$

Además existen otras funciones de pertenencia como por ejemplo: Función de Pertenencia Gamma, Función de Pertenencia L, Función de Pertenencia S, Función de Pertenencia Trapecio Extendido.

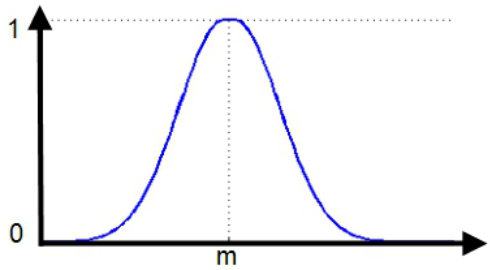



Figura 4.3: Función de Pertenencia Gaussiana.

### 4.1.3. Definiciones Básicas Relacionadas con los Conjuntos Difusos

En este apartado se introducen algunos de los conceptos básicos relacionados con la teoría de conjuntos difusos.

**Definición 3** *Se define el* ***soporte*** *de un conjunto difuso $\tilde{A}$ en el universo $U$, como el conjunto formado por todos los elementos de $U$ cuyo grado de*

*pertenencia a* $\tilde{A}$ *sea mayor que* 0*:*

$$Soporte(\tilde{A}) = \{u \in U \,|\, \mu_{\tilde{A}}(u) > 0\}$$

*Si a esta definición la restringimos a aquellos elementos del universo del discurso* $U$ *con grado de pertenencia igual a* 1*, tendríamos el núcleo del conjunto difuso.*

**Definición 4** *Se define el* ***núcleo*** *de un conjunto difuso* $\tilde{A}$ *en el universo* $U$*, como el conjunto formado por todos los elementos de* $U$ *cuyo grado de pertenencia a* $\tilde{A}$ *sea igual a* 1*:*

$$Nucleo(\tilde{A}) = \{u \in U \,|\, \mu_{\tilde{A}}(u) = 1\}$$

**Definición 5** *Se define la* ***altura*** *de un conjunto difuso* $\tilde{A}$ *como el mayor grado de pertenencia de todos los elementos de dicho conjunto:*

$$Altura(\tilde{A}) = max\{\mu_{\tilde{A}}(u) \,|\, u \in U\}$$

En determinadas ocasiones, puede ser importante conocer no sólo los elementos que pertenecen en algún grado al conjunto difuso, sino también conocer el conjunto de aquellos elementos que lo hacen con un valor igual o mayor a un umbral determinado $\alpha$ que se denomina $\alpha - corte$.

**Definición 6** *El* $\alpha$***-corte*** *de un conjunto difuso* $\tilde{A}$ *es el conjunto formado por todos los elementos del universo* $U$ *cuyos grados de pertenencia en* $\tilde{A}$ *son mayores o iguales que el valor de corte* $\alpha \in [0, 1]$*:*

$$\alpha_{\tilde{A}} = \{u \in U \,|\, \mu_{\tilde{A}}(u) \geq \alpha\}$$

**Definición 7** *Se denomina* ***conjunto de niveles*** *de un conjunto difuso* $\tilde{A}$*, al conjunto de grados de pertenencia de sus elementos:*

$$L(\tilde{A}) = \{a \,|\, \mu_{\tilde{A}}(u) = a,\, u \in U\}$$

**Definición 8** *Un* ***Conjunto Difuso es Convexo*** *si para cualquier punto entre* $u_1$ *y* $u_2$ *su grado de pertenencia es mayor o igual que el mínimo de los grados de pertenencia de* $u_1$ *y* $u_2$*.*

$$\mu_{\tilde{A}}(\lambda u_1 + (1 - \lambda)u_2) \geq Min\ \{\mu_{\tilde{A}}(u_1), \mu_{\tilde{A}}(u_2)\}$$

$\forall\, u_1, u_2 \in U; \forall\, \lambda \in [0, 1]$

**Definición 9** *Un* ***Conjunto Difuso es Concavo*** *si para cualquier punto entre* $u_1$ *y* $u_2$ *su grado de pertenencia es menor o igual que el máximo de los grados de pertenencia de* $u_1$ *y* $u_2$*.*

$$\mu_{\tilde{A}}(\alpha u_1 + (1 - \alpha)u_2) \leq Max\ \{\mu_{\tilde{A}}(u_1), \mu_{\tilde{A}}(u_2)\}$$

$\forall\, u_1, u_2 \in U; \forall\, \alpha \in [0, 1]$

**Definición 10** *Se denomina* ***cardinalidad*** *de un conjunto difuso en un universo finito dado a la suma, sobre los elementos del universo, de los grados de pertenencia a* $\tilde{A}$*:*

$$Card(\tilde{A}) = \sum_{u \in U} \mu_{\tilde{A}}(u)$$

## 4.2. El Enfoque Lingüístico Difuso

Tal y como hemos mencionado anteriormente, el interés de nuestra propuesta se centra en un proceso de análisis de decisión sobre tipos de tráfico de networking donde pueden participar múltiples expertos con diferentes funciones dentro de la organización y conocimiento transversal de la misma (conocimiento técnico y/o estratégico de la organización). Además pueden tener diferentes grados de experiencia lo que implica incertidumbre, imprecisión y subjetividad en la información manejada. Por tanto, consideramos que el uso de un modelado adecuado para el tratamiento de la incertidumbre e imprecisión mejorará los resultados en este proceso de decisión. En este sentido, el uso de la Lógica Difusa [181] y el Enfoque Lingüístico Difuso [182][183][184] facilitan el manejo de este tipo de información.

Aunque existen diferentes enfoques para modelar la información lingüística [100][119][120][163], en esta memoria utilizaremos el Enfoque Lingüístico Difuso ya que proporciona un método directo para modelar información lingüística mediante variables lingüísticas cuyo dominio de expresión son palabras o frases del lenguaje natural o artificial. Por ello, a continuación repasaremos el enfoque lingüístico difuso que utilizaremos para manejar y modelar la información vaga e imprecisa propuesta en el modelo de esta memoria de investigación.

Las situaciones y problemas presentes en el mundo real tienen características o atributos que se pueden modelar en base a la naturaleza propia de tales situaciones y problemas. Así podemos generalizar y reconocer aspectos de naturaleza cuantitativa (peso de un jockey) y cualitativa (confort de una silla). Cuando los atributos son de naturaleza cuantitativa, éstos requieren

ser valorados utilizando valores numéricos precisos. Sin embargo, cuando se trabaja con información vaga e imprecisa, los atributos son de naturaleza cualitativa, entonces los fenómenos no pueden modelarse fácilmente con información cuantitativa debido a su propia naturaleza. Este tipo de atributos suele aparecer frecuentemente en problemas en los que se pretende evaluar fenómenos relacionados con percepciones y relaciones de los seres humanos como el diseño, gusto o preferencia de una determinada característica o variable. En estos casos se suelen utilizar palabras del lenguaje natural (*rápido, lento, lindo, feo, etc.*) en lugar de valores numéricos para emitir sus juicios de valor.

Este tipo de problemas se ha resuelto con éxito mediante el uso del modelado lingüístico ya que mejora la fiabilidad y flexibilidad en el proceso de resolución. Este tipo de información fue utilizada con éxito en la resolución de numerosos problemas y aspectos de la ciencia como diagnóstico clínico [48], desempeño de una determinada acción en diferentes ramas de la toma de decisión [11][27][80][136], modelos de recuperación de información [19][85], etc.

El uso de un modelado lingüístico de preferencias puede deberse a varias razones [32][185]:

1. Cuando los expertos trabajan con información vaga o imprecisa y no pueden utilizar en estos casos información numérica precisa.

2. Cuando existen situaciones en las que la información no puede ser cuantificada debido a su naturaleza y suele ser habitual el uso de términos como *bueno*, *medio*, *malo*.

3. Cuando la información cuantitativa no puede medirse porque no están

disponibles los elementos necesarios para llevar a cabo una medición exacta o porque el costo de su medición es muy elevado. En este caso el uso de un "valor aproximado" que permita reflejar los distintos valores del problema puede ser adecuado.

El Enfoque Lingüístico Difuso tiene como base la Teoría de Conjuntos Difusos y utiliza variables lingüísticas cuyos valores son palabras o frases de un lenguaje natural o artificial [182][183][184].

**Definición 11** *Una **variable lingüística** está caracterizada por una quíntupla* $(H, T(H), U, G, M)$*, en la que:*

- $H$ *es el nombre de la variable.*
- $T(H)$ *es el conjunto de valores lingüísticos o etiquetas lingüísticas.*
- $U$ *es el universo de discurso de la variable.*
- $G$ *es una regla sintáctica (que normalmente toma forma de gramática) para generar los valores de* $T(H)$*.*
- $M$ *es una regla semántica que asocia a cada elemento de* $T(H)$ *su significado.*

*Para cada valor* $L \in T(H)$ *,* $M(L)$ *será un subconjunto difuso de* $U$*.*

Para utilizar variables lingüísticas desde el punto de vista del Enfoque Lingüístico Difuso es necesario llevar a cabo dos operaciones fundamentales:

1. Elección de una sintaxis adecuada de los términos lingüísticos, $T(H)$.

2. Definición de la semántica asociada a cada término lingüístico, es decir, su significado.

A continuación veremos ambas operaciones.

### 4.2.1. Elección de la Sintaxis de los Términos Lingüísticos

Para que una fuente de información (experto, administrador, etc.) pueda expresar con facilidad su información y/o conocimiento es necesario que disponga de un conjunto apropiado de descriptores lingüísticos. Para definir un conjunto de términos lingüísticos es importante establecer previamente la granularidad de la incertidumbre del conjunto de etiquetas lingüísticas, que es el cardinal del conjunto de etiquetas lingüísticas usadas para representar la información [16][17].

Se dice que un conjunto de términos lingüísticos tiene una granularidad baja o un tamaño de grano grueso cuando la cardinalidad del conjunto de etiquetas lingüísticas es pequeña. Esto significa que el dominio está poco particionado y que existen pocos niveles de distinción de la incertidumbre, produciéndose una pérdida de expresividad. Una granularidad alta o un tamaño de grano fino se da cuando la cardinalidad del conjunto de etiquetas lingüísticas es alta. Esta situación puede provocar un aumento de la complejidad en la descripción del dominio. La cardinalidad de un conjunto de términos lingüísticos no debe ser demasiado pequeña como para imponer una restricción de precisión a la información que quiere expresar cada fuente de información, y debe ser lo suficientemente grande para permitir hacer una

discriminación de las valoraciones en un número limitado de grados.

Según Miller [121], los seres humanos somos capaces de distinguir, recordar y utilizar correctamente alrededor de siete o nueve términos. En consecuencia, parece lógico establecer conjuntos de etiquetas lingüísticas que no sobrepasen los límites establecidos por la mente humana [143]. En los modelos lingüísticos se suelen usar conjuntos de etiquetas lingüísticas con granularidad no superior a 13, siendo muy común utilizar conjuntos de granularidad impar, donde el término medio representa una valoración de "aproximadamente 0.5" y el resto de las etiquetas se distribuyen simétricamente a su alrededor [17]. Así, la granularidad del conjunto de términos lingüísticos debe permitir una discriminación suficientemente buena y debe ser comprensible y diferenciable por el ser humano.

Una vez que la granularidad del conjunto de etiquetas lingüísticas ha sido determinada, es necesario un mecanismo para generar los términos lingüísticos. Existen dos enfoques para esto, uno define la sintaxis a partir de una gramática libre de contexto y el otro mediante un orden total definido sobre el conjunto de términos.

1. **Enfoque Basado en una Gramática Libre de Contexto.**
   Una posibilidad para generar un conjunto de términos lingüísticos consiste en utilizar una gramática libre de contexto $G$, donde el conjunto de términos pertenece al lenguaje generado por $G$ [16]. Una gramática generadora, $G$, es una 4-tupla $(V_N, V_T, I, P)$, siendo $V_N$ el conjunto de símbolos no terminales, $V_T$ el conjunto de símbolos terminales, $I$ el símbolo inicial y $P$ el conjunto de reglas de producción. La elección de estos cuatro elementos determinará la cardinalidad y forma del conjunto de términos lingüísticos. El lenguaje generado deberá ser lo

suficientemente grande para que pueda describir cualquier posible situación del problema. De acuerdo a las observaciones de Miller [121], el lenguaje generado no tiene que ser infinito, sino mas bien comprensible. Por ejemplo, entre los símbolos terminales y no terminales de $G$ podemos encontrar términos primarios (*alto, medio, bajo, etc*), modificaciones (*no, mucho, muy, más o menos, etc.*), relaciones (*mayor que, menor que, etc.*) y consideraciones (*y, o, pero, etc.*). Seleccionando $I$ como cualquier término primario, el conjunto de términos lingüísticos $T(H) = \{muy\, alto, alto, medio, \ldots\}$, se genera usando $P$.

2. **Enfoque basado en Términos Primarios con una Estructura Ordenada.**

   Una alternativa para reducir la complejidad de definir una gramática consiste en dar directamente un conjunto de términos distribuidos sobre una escala con un orden total definido [172][174][176]. Consideremos el ejemplo 2.

   **Ejemplo 2** *Supongamos el siguiente conjunto de 7 etiquetas:*

$$T(H) = \{N, MB, B, M, A, MA, P\}$$

$$s_0 = N = Nada \qquad s_1 = MB = MuyBajo \quad s_2 = B = Bajo$$
$$s_3 = M = Medio \qquad s_4 = A = Alto \qquad\qquad s_5 = MA = MuyAlto$$
$$s_6 = P = Perfecto$$

*donde* $s_i < s_j$ *sólo si* $i < j$.

Normalmente en estos casos es necesario que los términos lingüísticos satisfagan las siguientes condiciones adicionales:

- Existe un operador de negación. $Neg(s_i) = s_j,\ j = g - i$ ($g+1$ es la cardinalidad de $T(H)$).
- Tiene un operador de maximización. $Max(s_i, s_j) = s_i \ \ si \ \ s_i \geq s_j$.
- Tiene un operador de minimización. $Min(s_i, s_j) = s_i \ \ si \ \ s_i \leq s_j$.

### 4.2.2. Semántica del Conjunto de Términos Lingüísticos

Una vez seleccionada la sintaxis de los términos lingüísticos, también es necesario definir la semántica del conjunto de términos lingüísticos para dar significado a cada una de sus etiquetas. En la literatura existen varios enfoques para definir la semántica del conjunto de etiquetas lingüísticas [18][55] [101][149][150], siendo uno de los más utilizados el enfoque basado en funciones de pertenencia.

Este enfoque define la semántica del conjunto de términos lingüísticos utilizando números difusos en el intervalo $[0, 1]$, donde cada número difuso es descrito por una función de pertenencia.

Los parámetros de las funciones de pertenencia son un método eficiente desde un punto de vista computacional para caracterizar un número difuso. Debido a que las valoraciones lingüísticas dadas por las fuentes de información son aproximaciones, en la Figura 4.4 se muestra una representación paramétrica usando una 4-tupla $(a, b, d, c)$. Los parámetros "$b$" y "$d$" indican el intervalo en el que la función de pertenencia vale 1; mientras que "$a$" y "$c$" indican los extremos izquierdo y derecho de la función de pertenencia. En la Figura 4.5 se muestra la semántica de una variable lingüística que evalúa la

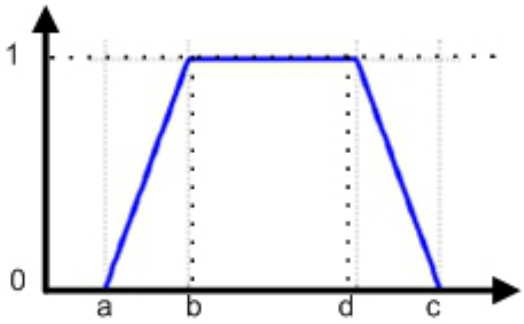



Figura 4.4: Número Difuso Trapezoidal.

altura de una persona, utilizando números difusos definidos por funciones de pertenencia trapezoidales.

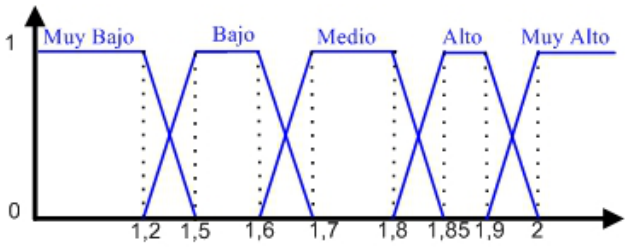



Figura 4.5: Ejemplo Semántico de la Variable Lingüística Altura.

Como hemos mencionado, un caso particular de la función de pertenencia trapezoidal se presenta cuando $b = d$, lo que transforma dicha función en función de pertenencia triangular. Se representan mediante una 3-tupla $(a, m, b)$, donde "$m$" es el valor donde la función de pertenencia triangular vale 1, mientras que "$a$" y "$b$" indican los extremos izquierdo y derecho de la función. La Figura 4.6 muestra un conjunto de etiquetas pero representado ahora con funciones de pertenencia triangulares en $[0, 1]$.

**Comentario 3** *En general, tal y como hemos mencionado, una función más compleja no añade mayor precisión ya que se está definiendo un concepto*

*vago e impreciso mediante valoraciones lingüísticas [50].*

Puede darse el caso de que diferentes fuentes propongan diferentes funciones asociadas a los términos lingüísticos debido a que pueden interpretar de forma distinta el mismo concepto. En esta situación existe una sintaxis similar para los términos lingüísticos pero con semántica diferente y suele presentarse en problemas con múltiples expertos o con múltiples criterios.

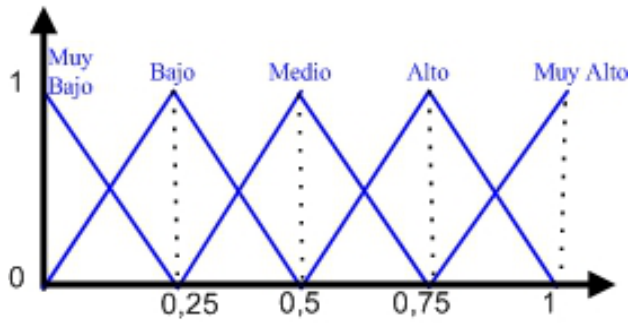



Figura 4.6: Ejemplo Semántico con Función de Pertenencia Triangular.

En cualquier tipo de problema donde se usan variables lingüísticas existe la necesidad de realizar procesos de computación con palabras, tales como comparación, negación y agregación de variables lingüísticas. En estos procesos se han utilizado distintos modelos que describiremos en la siguiente sección.

## 4.3. Modelos Lingüísticos Computacionales

Al tratar con información imprecisa en los problemas de toma de decisiones modelada a través de información lingüística se originan procesos de toma de decisión lingüística. Así, el uso de información lingüística para resolver problemas en procesos de decisión implica la necesidad de utilizar he-

rramientas para operar con tal información. Es decir, que se necesita realizar procesos de Computación con Palabras.

Los procesos de CW realizan cálculos con palabras del lenguaje natural donde se emulan los procesos cognitivos humanos para mejorar los procesos de resolución de problemas con incertidumbre. Consecuentemente la CW ha sido aplicada en procesos de toma de decisión con información lingüística porque provee herramientas cercanas al proceso de razonamiento humano, en el cual se mejora la resolución de problemas de decisión lingüísticos.

La CW se ha convertido en un tópico de investigación importante y se han propuesto diferentes metodologías y métodos para lograr tales procesos en un modo preciso y que a su vez los resultados sean fácilmente interpretados por los decisores [72][73][96][116].

En los siguientes apartados describiremos los modelos utilizados para realizar procesos de CW analizando para cada uno de ellos su método de representación de la información y su modelo computacional.

### 4.3.1. Modelo Computacional Lingüístico Basado en Funciones de Pertenencia

- a) Representación. Este modelo computacional está basado en el enfoque lingüístico difuso y representa la información de acuerdo a la Definición 11 y las funciones de pertenencia (Ver Figura 4.6).

- b) Computación. Este modelo realiza operaciones aritméticas extendidas con términos lingüísticos a través de cálculos asociados a las funciones de pertenencia de las etiquetas lingüísticas utilizando el principio

de extensión [48][98]. El principio de extensión se utiliza para generalizar las operaciones matemáticas "crisp" a operaciones con conjuntos difusos. El uso de la *aritmética difusa* incrementa la imprecisión de los resultados. Los resultados obtenidos mediante la aritmética difusa son números difusos que normalmente no coinciden con ningún término lingüístico del conjunto inicial de términos, por lo que se debe aplicar un proceso de *aproximación lingüística* a los resultados para poder expresarlos en el dominio inicial. Dichos procesos de aproximación consisten en seleccionar un conjunto difuso que represente la semántica de una etiqueta lingüística en el conjunto de etiquetas original y que sea lo más cercano en cuanto a significado, al conjunto difuso sin etiquetar que habíamos obtenido con la aritmética difusa. En la Figura 4.7 mostramos un operador de agregación lingüístico basado en el principio de extensión.

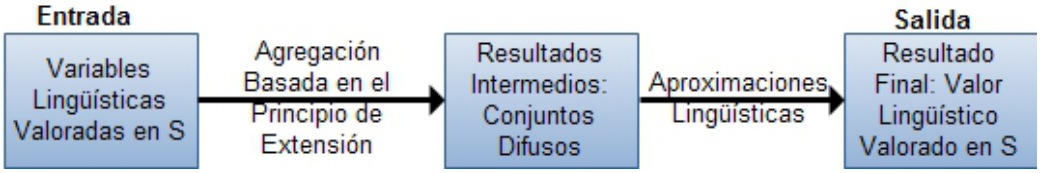



Figura 4.7: Operador de Agregación basado en el Principio de Extensión.

Formalmente se expresa como sigue:

$$S^n \xrightarrow{\tilde{F}} F(R) \xrightarrow{app_1(.)} S$$

siendo $S^n$ el producto cartesiano de $S$, $\tilde{F}$ un operador de agregación basado en el Principio de Extensión, $F(R)$ el conjunto de números difusos sobre el conjunto de números reales $\mathbb{R}$, $app_1(.)$ una función de aproximación lingüística y $S$ el conjunto de términos lingüístico

original. En la literatura se puede encontrar varias maneras de realizar aproximaciones lingüísticas [48][108][175].

### 4.3.2. Modelo Computacional Lingüístico Basado en Conjuntos Difusos Tipo-2

- a) Representación. Este modelo utiliza conjuntos difusos tipo-2 (ver Figura 4.8) para modelar las evaluaciones lingüísticas realizadas [117] [118] [153].

Figura 4.8: Conjunto de Términos Lingüísticos Representado por Conjuntos Difusos Tipo-2.

El uso de conjuntos difusos tipo-2 se ha justificado de diferentes maneras:

- En [153]: La representación Tipo-1 es un método "reduccionista" por el que se descarta la propagación de los valores de pertenencia por un promedio o por técnicas de ajuste de la curva y por lo tanto, camufla la "incertidumbre" embebida en la propagación de los valores de pertenencia.
- En [119]: Las palabras significan cosas diferentes para personas diferentes y por lo tanto son inciertas. Entonces, se necesita un

modelo de conjunto difuso para una palabra que tenga el potencial de capturar su incertidumbre, y un intervalo de conjuntos difusos tipo-2 debe ser utilizado como un modelo de conjunto difuso para una palabra.

- b) Computación. La mayor parte de las contribuciones usa intervalos de conjuntos difusos tipo-2 (es un tipo particular de conjuntos difusos tipo-1) que mantienen las propiedades de modelado de la incertidumbre de conjuntos difusos tipo-2 generales, pero reduciendo los esfuerzos computacionales que se necesitan para operar con ellos. En [52][190] se presentan el Promedio Ponderado Lingüístico y los operadores OWA Lingüísticos basados en representaciones tipo-2. Estos operadores pueden ser vistos como extensiones respectivas de la Agregación Ponderada Difusa y los operadores OWA donde los pesos y los atributos son palabras modeladas por intervalos de conjuntos difusos tipo-2.

  Como el modelo revisado anteriormente, el modelo basado en conjuntos difusos tipo-2 necesita realizar procesos de aproximación de los resultados a partir de una operación lingüística. Esto se realiza mediante el mapeo de los resultados en una evaluación lingüística, lo que produce pérdida de información.

### 4.3.3. Modelo Computacional Lingüístico Simbólico Basado en Escalas Ordinales

Los modelos simbólicos han sido ampliamente utilizados en Computación con Palabras debido a su simplicidad en el proceso computacional y su alta interoperabilidad. El propósito inicial de un modelo simbólico [166] es

utilizar los operadores max-min, y las nuevas propuestas simbólicas introducen la agregación basada en modelos de combinación convexa [49][163]. A continuación vamos a revisar brevemente diferentes modelos lingüísticos simbólicos basados en escalas ordinales.

#### 4.3.3.1. Modelo Computacional Lingüístico Simbólico basado en Escalas Ordinales y el operador max-min

- a) Representación. Este modelo [166] representa la información de acuerdo al enfoque lingüístico difuso (ver Figura 4.6) pero impone un ordenamiento lineal al conjunto de términos lingüísticos $S = \{s_0, s_1, \ldots, s_g\}$ tal que $s_i \geq s_j \Leftrightarrow i \geq j$.

- b) Computación. Este modelo utiliza la estructura ordenada del conjunto de términos lingüísticos para realizar cálculos simbólicos en tales escalas lingüísticas ordenadas. Así, se proponen los operadores clásicos Max, Min y Neg:

  - Operador de negación. $Neg(s_i) = s_{(g+1)-i}$ donde $g+1$ es la cardinalidad de $S$.
  - Operador de maximización. $Max(s_i, s_j) = s_i$ si $s_i \geq s_j$.
  - Operador de minimización. $Min(s_i, s_j) = s_i$ si $s_i \leq s_j$.

  Existen otros operadores que han sido propuestos para este modelo [24] [176].

#### 4.3.3.2. Modelo Computacional Lingüístico Simbólico basado en Combinaciones Convexas

- a) Representación. Este modelo [49] es una extensión del modelo revisado anteriormente y está basado en la misma representación básica.

- b) Computación. Este modelo proporciona una gama más amplia de operadores de agregación mediante el uso de la combinación convexa de etiquetas lingüísticas las cuales actúan directamente sobre los índices de etiquetas, $\{0, \ldots, g\}$, del conjunto de términos lingüísticos, $S = \{s_0, s_1, \ldots, s_g\}$, de manera recursiva produciendo un valor real en el intervalo de granularidad, $[0, g]$, del conjunto lingüístico $S$. Note que este modelo por lo general supone que la cardinalidad del conjunto de términos lingüísticos, $g + 1$, es impar y que las etiquetas lingüísticas son colocadas simétricamente en torno a un término medio. Como el resultado de una operación de agregación con combinación convexa no coincide generalmente con un término del conjunto de etiquetas $S$, también es necesario realizar un proceso de aproximación a través de la función $app_2(\cdot)$ para obtener una solución en el conjunto inicial $S$:

$$S^n \xrightarrow{C} [0, g] \xrightarrow{app_2(\cdot)} \{0, ..., g\} \rightarrow S$$

  Donde $C$ es el operador de agregación simbólico, $app_2(\cdot)$ es la función de aproximación usada para obtener el índice asociado a un término en $S$. En la Figura 4.9 se representa este modelo simbólico para una operación de agregación.

  De forma similar al Modelo Computacional Lingüístico basado en Funciones de Pertenencia, el proceso de aproximación produce pérdida de

información en el resultado final.

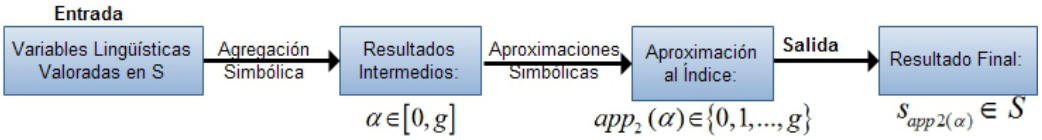



Figura 4.9: Operador de Agregación del Modelo Simbólico.

Algunos operadores de agregación basados en este modelo son el operador de Promedio Ponderado Lingüístico Ordenado (LOWA, Linguistic Ordered Weighted Averaging) [80] que está basado en el operador OWA y la combinación convexa de etiquetas lingüísticas, la Disyunción Lingüística Ponderada (LWD, Linguistic Weighted Disjunction), la Conjunción Lingüística Ponderada (LWC, Linguistic Weighted Conjunction), el Promedio Ponderado Lingüístico (LWA, Linguistic Weighted Averaging) [74], la Agregación Lingüística de Mayoría Aditiva (LAMA, Linguistic Aggregation of Majority Additive) [134] y la Mayoría Guiada Inducida Lingüística (MGIL, Majority Guided Induced Linguistic) [86].

### 4.3.4. Modelo Computacional Lingüístico 2-tupla.

El modelo lingüístico difuso 2-tupla es un modelo simbólico que extiende el uso de índices y fue presentado en [81]. Este modelo utiliza una representación continua de la información manteniendo la representación lingüística difusa (sintaxis y semántica) y permite realizar cálculos con palabras de forma precisa lo que reduce la pérdida de información que se produce en los modelos vistos anteriormente.

Para hacer esto, este modelo extiende la representación lingüística difusa agregando un nuevo parámetro.

- a) Representación. Consideremos que $S = \{s_0, s_1, \ldots, s_g\}$ es un conjunto de términos lingüísticos con cardinalidad impar donde el término medio representa una valoración aproximada de 0.5 y el resto de términos del conjunto se distribuyen simétricamente alrededor de este punto medio. Asumimos que la semántica asociada a cada término lingüístico viene dada por funciones de pertenencia triangulares, $(a, m, b)$, y consideramos que todos los términos están distribuidos sobre una escala donde hay establecida una relación de orden total, es decir $s_i \leq s_j \leftrightarrow i \leq j$.

  En este contexto lingüístico difuso, el Modelo Lingüístico Difuso 2-tupla se basa en el concepto de "*Traslación Simbólica*" donde la información lingüística es expresada por un par de valores, $(s_i, \alpha)$, donde el primer componente es el término lingüístico y el segundo componente es un valor numérico que soporta la *traslación simbólica*.

**Definición 12** *Sea $S = \{s_0, s_1, \ldots, s_g\}$ un conjunto de términos lingüísticos, y $\beta \in [0, g]$ un valor en el intervalo de granularidad de $S$. La* Traslación Simbólica *de un término lingüístico $s_i$ es un valor en el intervalo $[-.5, .5)$ que expresa la "diferencia de información" entre una cantidad de información expresada por el valor $\beta \in [0, g]$ obtenido en una operación de agregación simbólica y el valor entero más próximo, $i \in \{0, \ldots, g\}$, que indica el índice de la etiqueta lingüística $(s_i)$ más cercana en $S$.*

A partir de estos conceptos, el modelo de representación lingüística 2-tupla usa como base de representación un par de valores o 2-tupla, $(s_i, \alpha)$, donde $s_i \in S$ y $\alpha \in [-.5, .5)$.

Este modelo define un conjunto de funciones de transformación entre valores numéricos y valores lingüísticos 2-tupla que facilitan los procesos computacionales lingüísticos.

**Definición 13** *Sea* $S = \{s_0, s_1, \ldots, s_g\}$ *un conjunto de términos lingüísticos, y* $\beta \in [0, g]$ *un valor que representa el resultado de una operación simbólica, entonces la 2-tupla lingüística,* $(s_i, \alpha) \in \overline{S} = S \times [-.5, .5)$*, que expresa la información lingüística equivalente a* $\beta$ *se obtiene usando la siguiente función:*

$$\Delta : [0, g] \to \overline{S}$$

$$\Delta(\beta) = (s_i, \alpha), \; con \begin{cases} s_i, & i = round(\beta) \\ \alpha = \beta - i, & \alpha \in [-.5, .5) \end{cases} \tag{4.1}$$

*donde* $round(\cdot)$ *es el operador usual de redondeo,* $s_i$ *es la etiqueta con índice más cercano a* $\beta$ *y* $\alpha$ *es el valor de la traslación simbólica.*

Conviene señalar que $\Delta$ es biyectiva, y $\Delta^{-1} : \overline{S} \to [0, g]$ es definida como $\Delta^{-1}(s_i, \alpha) = i + \alpha = \beta$. En este sentido, una 2-tupla en $\overline{S}$ queda identificada con un valor en el intervalo $[0, g]$.

**Comentario 4** *A partir de las definiciones anteriores, la conversión de un término lingüístico en una 2-tupla consiste en añadir el valor cero como traslación simbólica:*

$$s_i \in S \Rightarrow (s_i, 0) \in \overline{S}$$

**Ejemplo 3** *Supongamos el siguiente conjunto de términos lingüísticos*

$s_0 = MB = MuyBajo$ $s_1 = B = Bajo$ $s_2 = M = Medio$
$s_3 = A = Alto$ $s_4 = MA = MuyAlto$

*donde* $s_i < s_j \rightarrow i < j$ *y que como resultado de una operación de agregación simbólica se obtiene el valor* $\beta = 1.8$. *La representación de este valor mediante la 2-tupla sería:*

$$\Delta(\beta) = (s_2, -.2)$$

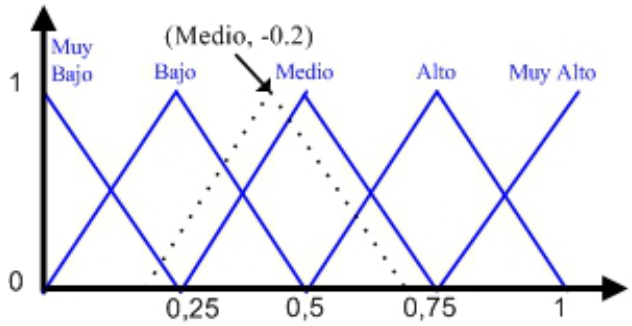



Figura 4.10: Representación Lingüística 2-tupla.

La figura 4.10 muestra gráficamente el ejemplo de esta etiqueta lingüística según el modelo de representación 2-tupla.

- b) Computación. El modelo de representación de información lingüística difusa 2-tupla definió un modelo computacional asociado presentando operadores de comparación, negación y agregación [81].

  1. Operador de comparación 2-tuplas. La comparación de información lingüística representada mediante 2-tuplas se realiza de acuerdo a un orden lexicográfico. Consideremos dos 2-tupla, $(s_k, \alpha_1)$, y,$(s_l, \alpha_2)$, que representan cantidades de información:

     - Si $k < l$ entonces $(s_k, \alpha_1)$ es menor que $(s_l, \alpha_2)$
     - Si $k = l$ entonces:

- Si $\alpha_1 = \alpha_2$ entonces $(s_k, \alpha_1)$ y $(s_l, \alpha_2)$ representan la misma información.
- Si $\alpha_1 < \alpha_2$ entonces $(s_k, \alpha_1)$ es menor que $(s_l, \alpha_2)$
- Si $\alpha_1 > \alpha_2$ entonces $(s_k, \alpha_1)$ es mayor que $(s_l, \alpha_2)$

2. Operador de negación 2-tupla.

$$Neg(s_i, \alpha) = \Delta(g - (\Delta^{-1}(s_i, \alpha))) \tag{4.2}$$

siendo $g + 1$ la cardinalidad del conjunto de etiquetas lingüísticas $S$.

3. Agregación 2-tupla. La agregación de información consiste en obtener un valor que resuma un conjunto de valores, por lo que la agregación de varias 2-tuplas debe ser una 2-tupla. En la literatura se pueden encontrar numerosos operadores que permiten agregar información con diferentes criterios [52][134][164][171][187][190]. Muchos de estos operadores pueden ser extendidos para trabajar con 2-tupla usando las funciones $\Delta$ y $\Delta^{-1}$ que transforman valores numéricos en 2-tuplas y viceversa sin pérdida de información [51] [81][92][156][158][160][161] [179][189]. A continuación veremos algunos de ellos:

**Definición 14** *Media Aritmética. Sea* $x = \{(r_1, \alpha_1), \ldots, (r_n, \alpha_n)\}$ *un conjunto de 2-tuplas lingüísticas. La 2-tupla que simboliza la media aritmética* $\overline{x}^e$*, se calcula de la siguiente forma:*

$$\overline{x}^e[(r_1, \alpha_1), .., (r_n, \alpha_n)] = \Delta(\frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n} \Delta^{-1}(r_i, \alpha_i)) = \Delta(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \beta_i) \tag{4.3}$$

**Definición 15** *Media Ponderada. Sea* $x = \{(r_1, \alpha_1), \ldots, (r_n, \alpha_n)\}$ *un conjunto de 2-tuplas lingüísticas y* $w = \{w_1, \ldots, w_n\}$ *un vector numérico con sus pesos asociados, la 2-tupla que simboliza la media ponderada* $\overline{x}^w$ *se calcula de la siguiente manera:*

$$\overline{x}^w[(r_1, \alpha_1), .., (r_n, \alpha_n)] = \Delta(\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta^{-1}(r_i, \alpha_i).w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}) = \Delta(\frac{\sum_{i=1}^{n} \beta_i.w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}) \quad (4.4)$$

**Definición 16** *Media Ponderada Lingüística. Sea* $x = \{(r_1, \alpha_1), \ldots, (r_n, \alpha_n)\}$ *un conjunto de 2-tuplas lingüísticas y* $W = \{(w_1, \alpha_1^w), .., (w_n, \alpha_n^w)\}$ *sus pesos asociados representados mediante 2-tuplas lingüísticas. La 2-tupla que simboliza la media ponderada lingüística* $\overline{x}_l^w$ *se calcula de la siguiente manera:*

$$\overline{x}_l^w[((r_1, \alpha_1), (w_1, \alpha_1^w), .., (r_n, \alpha_n)(w_n, \alpha_n^w))] = \Delta(\frac{\sum_{i=1}^{n} \beta_i.\beta_{w_i}}{\sum_{i=1}^{n} \beta_{w_i}}), \quad (4.5)$$

*con,* $\beta_i = \Delta^{-1}(r_i, \alpha_i)$ *y* $\beta_{w_i} = \Delta^{-1}(w_i, \alpha_i^w)$

**Definición 17** *Operador OWA en 2-tupla. Sea* $((r_1, \alpha_1), .., (r_n, \alpha_n))$ *un conjunto de 2-tuplas lingüísticas y* $w = (w_1, ..., w_n) \in [0, 1]^n$ *un vector de pesos asociado tal que* $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$*. El operador 2-tupla OWA asociado con* $w$ *es definido por:*

$$G^w[(r_1, \alpha_1), .., (r_n, \alpha_n)] = \Delta\left(\sum_{i=1}^{n} w_i \beta_i^*\right) \quad (4.6)$$

*donde* $\beta_i^*$ *es el i-ésimo elemento más grande de* $\{\Delta^{-1}(r_1, \alpha_1), .., \Delta^{-1}(r_n, \alpha_n)\}$

**Definición 18** *Operador OWA Inducido (IOWA) en 2-tupla. El operador de agregación lingüística 2-tupla IOWA de dimensión n se realiza mediante la siguiente función:*

$$\Phi_W\left[\langle u_1, p_1\rangle, \ldots, \langle u_n, p_n\rangle\right] = \Delta(\sum\nolimits_{i=1}^{n} w_i.\Delta^{-1}(p_{\sigma(i)})), \quad (4.7)$$

$$p_i \in \overline{S}$$

*siendo* $\sigma$ *una permutación de* $\{1, \ldots, n\}$ *tal que* $u_{\sigma(i)} \geq u_{\sigma(i+1)}$, $\forall i = 1, ..n-1$. *Es decir,* $\langle u_{\sigma(1)}, p_{\sigma(1)} \rangle$ *es la 2-tupla con* $u_{\sigma(i)}$ *es el i-ésimo valor más grande en el conjunto* $\{u_1, \ldots, u_n\}$.
*El reordenamiento del conjunto de valores a ser agregados (variable argumento)* $\{p_1, \ldots, p_n\}$*, es realizado por una variable de inducción de orden asociada* $\{u_1, \ldots, u_n\}$.

Para finalizar, es importante mencionar que se ha demostrado que el modelo computacional lingüístico 2-tupla es un modelo útil en el tratamiento de contextos con múltiples escalas lingüísticas y procesos de decisión multi-experto que son la base de nuestra propuesta de investigación [77][78][83][90].

## Capítulo 5

# Modelo Lingüístico de QoS en Networking

Para gestionar el desempeño y diferenciar el tráfico de red según necesidades específicas de una organización, en la Sección 2.1 hemos revisado algunos de los modelos estandarizados más importantes y su evolución desde los *servicios de mejor esfuerzo* hasta técnicas más sofisticadas como IntServ, DiffServ y MPLS. Estos modelos pueden trabajar en diferentes capas de la pila de protocolos TCP/IP y tanto en tecnologías libres como propietarias. Sin embargo, la evolución lógica de los modelos está orientada a propuestas de *QoS inteligente* y *QoS como herramienta de seguridad* [147] (ver Figura 2.3). Naturalmente estas nuevas tendencias pueden hacer uso de los modelos estándares revisados y diversos mecanismos para su implementación como las herramientas de *Control de Tráfico* (ver Secciones 2.2 y 2.3).

De acuerdo a estos modelos estándares de QoS, a las herramientas de CT y al escenario organizacional donde se implementará nuestra propuesta surgen algunos inconvenientes adicionales relacionados con la dificultad y complejidad de implementación de estas técnicas tal como mostramos en el

***Anexo A***. A esto se le suma la falta de una solución integral útil en la decisión del comportamiento del tráfico de networking en una organización.

Por estos motivos existe la necesidad de contar con procesos más evolucionados y eficaces de decisión que incrementen el orden y prevean "inteligencia" en los dominios administrativos de la red local para las organizaciones. Una implementación de un modelo para dar QoS con estas características y con la posibilidad de integrarlo con herramientas de seguridad puede resultar sumamente productiva y cubrir la necesidad de una gestión adecuada de los recursos de networking en dichas organizaciones.

Actualmente, los responsables de gestionar y tomar decisiones sobre el comportamiento del tráfico en networking son los administradores de red, los cuales generalmente trabajan de forma individual o aislada. Por este motivo, es común que ellos tengan una visión no realista acerca de ciertas necesidades de priorización del tráfico en la organización, y que necesiten la participación de otras fuentes de información para completar correctamente el proceso de decisión sobre el tráfico de red e implementar los mecanismos de QoS. Una situación frecuente se presenta cuando ante el mismo escenario, diferentes administradores de red pueden tener diferentes soluciones para un mismo problema o, inclusive, tienen una visión sesgada de ciertos aspectos del problema real.

Ante dicha situación, el hecho de que se sumen diferentes fuentes de información con distintos puntos de vista y grados de conocimiento podría mejorar el proceso de gestión y decisión sobre el tráfico de networking. Sin embargo, este hecho implica que aumente la incertidumbre y subjetividad en un proceso de decisión. Es por ello que proponemos una solución que integre diferentes fuentes con conocimiento transversal de la organización para deci-

dir el esquema de QoS necesario y que a su vez nuestra solución sea capaz de tratar la incertidumbre propia del problema.

Entre los beneficios de una propuesta con estas características, a través de un modelo de decisión, podemos indicar los siguientes:

- Mejora de la productividad de la organización debido al uso inteligente de sus recursos con un proceso de AD.
- Mejora de la percepción de los usuarios sobre el rendimiento de la red.
- Capacidad del modelo de permitir la participación en el proceso de diversos usuarios con diferente grado de conocimiento sobre QoS o la organización en forma transversal. Ellos, a través de sus preferencias, participan del proceso con las siguientes metas para mejorar la QoS en la organización:

    1. Dar a la organización una mayor productividad global en cuanto al uso de recursos de networking.
    2. Dar mayor prioridad para tipos de tráfico de misión crítica que no pueden retrasarse.
    3. Disminuir el rendimiento o bloquear tipos de tráfico que podrían afectar al tráfico importante.

Para lograr estos beneficios y resolver el problema enunciado, en esta memoria de investigación presentamos un esquema de decisión para QoS en networking compuesto esencialmente de dos niveles lógicos en cuanto a funcionalidad y propósito (nivel superior y nivel inferior) como se observa en la Figura 5.1.

En el **nivel superior** se encuentra un proceso de Análisis de Decisión

cuyos resultados sirven de entrada al nivel inferior y permiten resolver el problema planteado. En este nivel presentamos los resultados principales de nuestra memoria de investigación con un modelo flexible de decisión para cubrir las necesidades de QoS de la organización (ver Figura 5.1) al que llamaremos *Modelo de QoS en Networking basado en Análisis de Decisión Multi-Experto* (QOSAD).

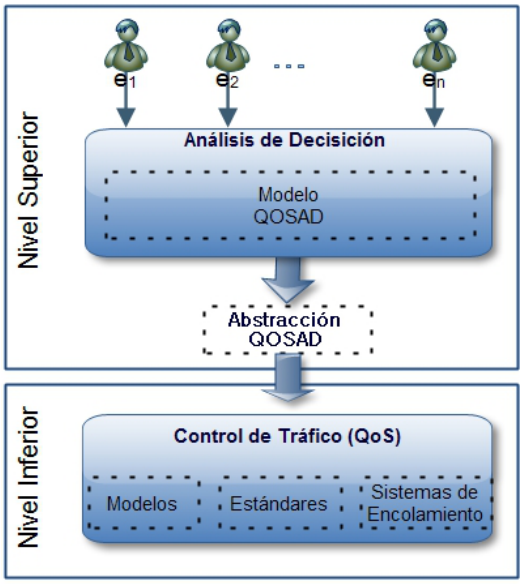



Figura 5.1: Esquema de Abstracción entre CT y el Proceso de Decisión.

La flexibilidad del modelo propuesto está dada por el propio contexto de definición del problema que implica la participación de múltiples fuentes de información con distinto grado de conocimiento y experiencia en el proceso de decisión. Estas fuentes, además de administradores de red, pueden ser expertos de diferentes áreas de conocimiento o expertos que trabajen en diferentes departamentos de la organización donde cada uno tiene su propia visión o perspectiva para mejorar la productividad global. Esto da a los administradores de red mayor riqueza de información en cuanto a las necesidades de

diferentes departamentos o diferentes administradores.

Esta situación origina que puedan incluirse en el proceso diferentes expertos sin conocimiento de tecnologías de control de tráfico, pero ellos, mediante una buena orientación, pueden saber qué grado de importancia tienen ciertas aplicaciones, servicios y usuarios porque conocen el funcionamiento de la organización y pueden enriquecer el conocimiento global debido a su conocimiento transversal estratégico de dicha organización. Por lo tanto, por el propio contexto de definición del problema y debido a que no es necesario que los expertos conozcan las tecnologías de QoS, es conveniente que se les brinde la posibilidad de expresar su valoración en términos comprensibles mediante palabras del lenguaje natural.

En este sentido, el uso de información lingüística lleva inherente la aparición de incertidumbre en la información expresada. Por lo tanto, es necesario que el modelo propuesto incluya las herramientas para manejar este tipo de información. Así, las preferencias de los expertos con distinto grado de conocimiento sobre diferentes aspectos relativos al comportamiento de la red, harán centrar nuestra propuesta para el *nivel superior* en el uso de un marco de trabajo flexible donde se ofrecen diferentes escalas lingüísticas para la valoración de dichas preferencias.

El **nivel inferior** consiste en un conjunto de herramientas que utilizan los administradores de red para implementar calidad de servicio en las redes organizacionales. En nuestra memoria de investigación este nivel consiste en la implantación de procesos de Control de Tráfico para priorizar tipos de tráfico según su relevancia dentro de la organización y así ordenar el tráfico de networking. Este proceso se puede llevar a cabo con diferentes tecnologías, como por ejemplo CT en SWL que hemos revisado en la Sección 2.3, las cuales

están apoyadas en estándares y hemos ejemplificado su implementación en el ***Anexo A***.

Por otro lado, el proceso de priorización de los diferentes servicios de red con mecanismos de control de tráfico y el proceso de análisis de decisión hacen que sea necesario proponer un método que sirva para acoplar o enlazar ambos procesos. Para lograrlo, ambos niveles funcionales deben poder interactuar o comunicarse entre sí a través de una *capa de abstracción* que sirva de enlace entre ambos de un modo transparente. En este sentido, el modelo propuesto proveerá una arquitectura de gestión de los tipos de tráfico de red que consta de un nivel superior de decisión con un método que sirve de entrada al nivel inferior de CT.

Por lo tanto, el modelo propuesto está basado en un esquema de análisis de decisión para dar soporte a la TD definida en un marco flexible con múltiples escalas lingüísticas y un método de abstracción que interactúe con el nivel inferior. En él participan múltiples expertos que expresan sus preferencias sobre tipos de tráfico usando diferentes escalas lingüísticas según su grado de conocimiento.

En este capítulo presentamos los resultados principales de nuestra memoria de investigación y se estructura de la siguiente manera. A continuación, debido a que en nuestra propuesta trabajamos con múltiples escalas lingüísticas, comenzamos introduciendo los modelos que utilizamos para el tratamiento de la Información Lingüística Multigranular (ILM). Posteriormente describimos las fases del modelo de decisión para QoS y su algoritmo de abstracción.

## 5.1. Modelos Computacionales para Información Lingüística Multigranular.

El tratamiento de contextos con ILM es de gran interés para alcanzar los objetivos propuestos en esta memoria de investigación puesto que son estos contextos los que utilizaremos para ofrecer un marco flexible a los expertos participantes del proceso de decisión para expresar sus valoraciones sobre los distintos tipos de tráfico de networking.

En la literatura existen diferentes enfoques para manejar información lingüística multigranular [30][34][77][83][89]. Estos enfoques presentan diferentes herramientas y métodos para operar con múltiples escalas lingüísticas presentando ciertas limitaciones a la hora de expresar valoraciones, falta de precisión en los resultados o elevada complejidad en su uso [56].

En el modelo propuesto para QoS necesitamos un enfoque que dé flexibilidad a los expertos para expresar sus valoraciones y que los resultados al finalizar el proceso de decisión sean precisos. En este sentido, nuestra propuesta sigue el esquema de un problema de toma de decisión multiexperto definido en un contexto de información lingüística multigranular donde un conjunto de expertos expresa sus valoraciones sobre los tipos de tráfico de networking usados en la organización con el objeto de obtener una valoración global de los mismos.

Formalmente, el proceso de toma de decisión multiexperto tiene los siguientes elementos:

- Un conjunto finito de expertos, $E = \{e_1, e_2, \ldots, e_m\}$, que participan del

proceso de decisión.

- Un conjunto de alternativas, $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$.
- Un conjunto formado por todos los conjuntos de términos lingüísticos que utilizan los expertos al que llamaremos $F_{MS}$.

Donde cada experto $e_i$ expresa su valoración lingüística sobre la alternativa $x_j$ usando una etiqueta, $s_j^i$, del conjunto de términos lingüísticos $S_i = \{s_j^i, j = 0, \ldots, g_i\} \in F_{MS}$. El conjunto formado por todos los conjuntos de términos que utilizan los expertos define el dominio de expresión del problema $F_{MS} = \{S_i, i = 1, \ldots, f;\ \ con\ \ f > 1\}$, donde cada $S_i$ está caracterizado por su propia granularidad de incertidumbre y/o semántica.

En problemas de decisión, para llevar a cabo procesos de computación con palabras en contextos multigranulares existen distintos enfoques [30][34][77] [83][89]. Todos ellos tienen diferentes dominios de expresión pero siguen un mismo esquema que está dividido en 2 fases:

1. *Proceso de unificación de información.* Inicialmente se transforma la información lingüística expresada en diferentes dominios en un único dominio de expresión.
2. *Proceso computacional.* Una vez que la información es expresada en un único dominio de expresión, en esta fase se lleva a cabo el proceso de agregación de la información.

Para proponer nuestro modelo de decisión para QoS en networking en esta memoria de investigación nos centramos en el uso de las Jerarquías Lingüísticas Extendidas (ELH, Extended Linguistic Hierarchies) [56] debido a que

cumplen con los requisitos de dar total flexibilidad a los expertos para expresar sus valoraciones y los resultados obtenidos al finalizar el proceso de decisión son precisos. Además, permiten operar en contextos lingüísticos multigranulares utilizando un modelo simbólico lo que facilita la comprensión y los procesos de computación con palabras en los problemas de decisión.

En consecuencia, como el uso de las ELH se adapta mejor a nuestra propuesta, inicialmente revisaremos las Jerarquías Lingüísticas (LH, Linguistic Hierarchy) [83] ya que son la base para la definición de las ELH. Para ello en los siguientes apartados revisaremos ambos enfoques y nos centraremos en tres aspectos principales: el dominio de expresión, el proceso de unificación de la información y el proceso de computación.

### 5.1.1. Jerarquías Lingüísticas

Una de las características importantes de las LH es que al mismo tiempo de ofrecer un dominio de trabajo flexible para manejar información lingüística multigranular, obtiene precisión en los resultados finales independientemente del dominio de expresión utilizado [83].

Este modelo está basado en la definición de una Jerarquía Lingüística y en el modelo de representación lingüística 2-tupla que fue descrito anteriormente (ver Sección 4.3.4).

#### a) Dominio de Expresión.

Como hemos visto anteriormente, el dominio de expresión o marco de definición del problema determina la estructura y representación de la infor-

mación usada en el problema.

En este enfoque el dominio de expresión está limitado, es decir, que se imponen una serie de reglas y condiciones para trabajar con información valorada en distintas escalas lingüísticas. Dichas reglas están asociadas al modo de construcción de una jerarquía lingüística, por lo que vamos a describir tal construcción.

**Construcción de una Jerarquía Lingüística.**

Las *Jerarquías Lingüísticas* están compuestas por un conjunto de niveles, donde cada nivel es un conjunto de términos lingüísticos con distinta granularidad del resto de los niveles de la jerarquía. A cada uno de los niveles de la jerarquía se los formaliza como:

$$l(t, n(t))$$

siendo $t$ el número que indica el nivel de la jerarquía y $n(t)$ la granularidad del conjunto de términos lingüísticos del nivel $t$.

Las Jerarquías Lingüísticas asumen que las etiquetas lingüísticas tienen funciones de pertenencia triangulares, simétricas y uniformemente distribuidas en el intervalo $[0, 1]$. Además, los conjuntos de términos lingüísticos tienen granularidad impar, con el valor de la etiqueta central indicando un valor de indiferencia.

Los niveles de una Jerarquía Lingüística están ordenados en función de su granularidad, es decir, que para dos niveles consecutivos $t$ y $t + 1$, $n(t + 1) > n(t)$. Por lo tanto, en cada nivel $t + 1$ se proporciona un refinamiento lingüístico con respecto al nivel $t$. Formalmente, se define a la Jerarquía

Lingüística $LH$ como la unión de todos los niveles $t$ que la conforman:

$$L\,H\ = \bigcup_{t} l\,(t, n\,(t)\,)$$

Para realizar la construcción de una Jerarquía Lingüística partimos de que un conjunto de etiquetas $S^{n(t)} = \{S_0^{n(t)}, \ldots, S_{n(t)-1}^{n(t)}\}$ es el conjunto de términos lingüísticos definidos para el nivel $t$ con $n(t)$ términos. Entonces la construcción de una Jerarquía Lingüística debe satisfacer las siguientes reglas básicas [83]:

- **Regla 1.** Conservar todos los puntos modales previos de las funciones de pertenencia de cada uno de los términos lingüísticos de cada nivel con respecto a los del siguiente nivel. Esta regla garantiza que todos los puntos modales se mantengan de un nivel $t$ al siguiente $t+1$, siendo ésta la clave para realizar los procesos de computación sin pérdida de información.

  **Lema 1** *Sea $S^{n(t)} = \{S_0^{n(t)}, \ldots, S_{n(t)-1}^{n(t)}\}$ un conjunto de términos lingüísticos para una variable lingüística en $LH$. El conjunto de puntos modales del nivel $t$ es definido como:*

  $$FP_t\ = \{fp_t^0,\ \ldots\ fp_t^i,\ \ldots, fp_t^{2\cdot\delta_t}\}$$

  *donde cada punto formal $fp_t^i\ \in\ [0,1]$ es localizado en*

  $$fp_t^i = \frac{i}{2\cdot\delta_t}\ \in [0,1],$$

  *siendo $\delta_t = n(t) - 1\ \in\ \mathbb{N}$.*

- **Regla 2.** Hacer que las transiciones entre dos niveles consecutivos sean

suaves. El objetivo es construir un nuevo conjunto de términos lingüísticos, $S^{n(t+1)}$, de forma que añadiremos un nuevo término lingüístico entre cada pareja de términos pertenecientes al conjunto de términos del nivel anterior $t$. Para realizar esta operación se reduce el soporte de las etiquetas lingüísticas para dejar espacio para la nueva etiqueta. Esta regla proporciona un modo simple y rápido para guardar los puntos formales de un nivel $t$ a su sucesor $t+1$, definiendo la granularidad entre dos niveles sucesivos como:

$$n(t+1) = 2 \cdot n(t) - 1 \tag{5.1}$$

De forma genérica se puede decir que el conjunto de términos del nivel $t+1$ se obtiene de su predecesor de la siguiente manera:

$$l(t, n(t)) \rightarrow (t+1, 2 \cdot n(t) - 1)$$

La Tabla 5.1 muestra que la granularidad necesaria en cada conjunto lingüístico del nivel $t+1$, $S^{n(t+1)}$, se obtiene del nivel anterior $t$, $n(t)$.

| | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
|---|---|---|---|
| $l(t, n(t))$ | $l(1, 3)$ | $l(2, 5)$ | $l(3, 9)$ |
| $l(t, n(t))$ | $l(1, 7)$ | $l(2, 13)$ | |

Tabla 5.1: Granularidad Necesaria para 3 Niveles de la LH.

La Figura 5.2 muestra una Jerarquía Lingüística compuesta de 3 niveles de 3, 5 y 9 etiquetas donde la granularidad de cada nivel en LH está determinada por el primer nivel. Si definimos el primer nivel $l(1, 3)$, los siguientes niveles son $l(2, 5)$, $l(3, 9)$, etc. De esta regla surge la restricción de que no se puedan usar jerarquías lingüísticas con conjuntos de etiquetas lingüísticas de

cualquier granularidad como, por ejemplo 5, 7 y 9.

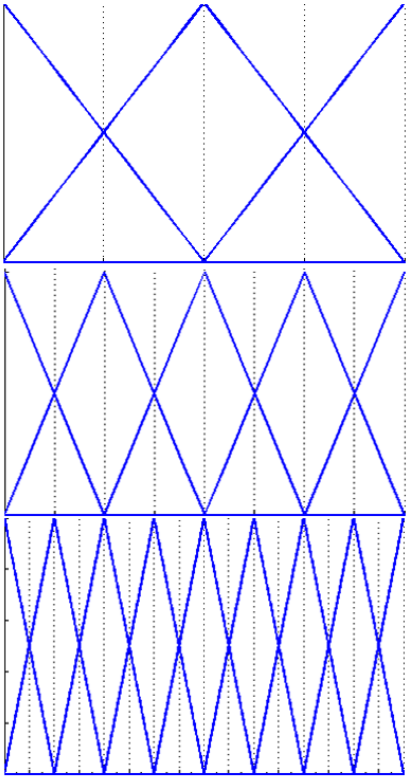


Figura 5.2: Jerarquía Lingüística de 3, 5 y 9 Etiquetas.

Este hecho hace que se restrinjan los conjuntos de términos lingüísticos que pueden pertenecer al dominio de expresión, siendo únicamente posible utilizar conjuntos de etiquetas que estén definidos sobre una misma LH.

**b) Proceso de Unificación.**

Debido a que los expertos pueden expresar sus opiniones en contextos lingüísticos multigranulares, para poder realizar los cálculos computacionales es necesario unificar la información lingüística expresada en distintos conjuntos de términos lingüísticos. Para realizar este proceso, este enfoque se basa en el modelo de representación lingüístico 2-tupla que fue descrito en la

Sección 4.3.4, lo que permite realizar el proceso de unificación de una forma simbólica y precisa (sin pérdida de información).

Para realizar el proceso de unificación, en [83] se definieron una serie de funciones de transformación entre etiquetas de diferentes niveles de la LH.

**Definición 19** *[83] Sea* $LH = \bigcup_t l(t, n(t))$ *una jerarquía lingüística cuyos conjuntos de términos notaremos como* $S^{n(t)} = \{S_0^{n(t)}, \ldots, S_{n(t)-1}^{n(t)}\}$. *La función de transformación de un término del nivel* $t$ *a uno del nivel* $t+1$ *se define como:*

$$TF_{t+1}^t : l(t, n(t)) \rightarrow l(t+1, n(t+1))$$

$$TF_{t+1}^t(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}) = \Delta\left(\frac{\Delta^{-1}(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}) \cdot (n(t+1) - 1)}{n(t) - 1}\right)$$

De la misma manera para pasar desde un nivel $t$ a un nivel $t-1$.

**Definición 20** *[83] Sea* $LH = \bigcup_t l(t, n(t))$ *una jerarquía lingüística cuyos conjuntos de términos notaremos como* $S^{n(t)} = \{S_0^{n(t)}, \ldots, S_{n(t)-1}^{n(t)}\}$. *La función de transformación de un término del nivel* $t$ *a uno del nivel* $t-1$ *se define como:*

$$TF_{t-1}^t : l(t, n(t)) \rightarrow l(t-1, n(t-1))$$

$$TF_{t-1}^t(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}) = \Delta\left(\frac{\Delta^{-1}(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}) \cdot (n(t-1) - 1)}{n(t) - 1}\right)$$

La función que permite generalizar las transformaciones entre términos de niveles no consecutivos se define como sigue.

**Definición 21** *[83] Sea* $LH = \bigcup_t l\,(t, n\,(t)\,)$ *una jerarquía lingüística cuyos conjuntos de términos notaremos como* $S^{n(t)} = \{S_0^{n(t)}, \ldots, S_{n(t)-1}^{n(t)}\}$. *La función de transformación recursiva de una etiqueta lingüística de un nivel* $t$ *a uno del nivel* $t' = t + a$ *con* $a \in Z$ *se define como:*

$$TF_{t'}^{t} : l(t,\, n(t)) \;\rightarrow\; l(t', n(t'))$$

*Si* $|a| > 1$ *entonces,*

$$TF_{t'}^{t}\,(s_i^{n(t)}\,,\, \alpha^{n(t)}) \;=\; TF_{t'}^{\,t+\frac{t-t'}{|t-t'|}}(TF_{\,t+\frac{t-t'}{|t-t'|}}^{t}\,(s_i^{n(t)}\,,\, \alpha^{n(t)})\,)$$

*Si* $|a| = 1$ *entonces,*

$$TF_{t'}^{t}\,(s_i^{n(t)}\,,\, \alpha^{n(t)}) \;=\; TF_{\,t+\frac{t-t'}{|t-t'|}}^{t}\,(s_i^{n(t)}\,,\, \alpha^{n(t)})\,)$$

*Esta función se puede definir no recursivamente de la siguiente manera:*

$$TF_{t'}^{t} : l(t,\, n(t)) \;\rightarrow\; l(t\,',\, n(t')\,)$$

$$TF_{t'}^{t}\,(s_i^{n(t)}\,,\, \alpha^{n(t)}) \;=\; \Delta\left(\frac{\Delta^{-1}\,(s_i^{n(t)},\, \alpha^{n(t)}) \;\cdot\; (\,n(t') \;-\; 1\,)}{n(t) \;-\; 1}\right) \tag{5.2}$$

Estos resultados garantizan que la transformación entre niveles de una jerarquía lingüística se realiza sin pérdida de información.

**Proposición 1** *[83] La familia de funciones de transformación entre etiquetas lingüísticas de diferentes niveles de una jerarquía es biyectiva:*

$$TF_{t}^{t'}\,(TF_{t'}^{t}\,(s_i^{n(t)}\,,\, \alpha^{n(t)})\,) \;=\; (s_i^{n(t)}\,,\, \alpha^{n(t)})$$

$$TF_{t'}^{t}\,(s_i^{n(t)},\,\alpha^{n(t)}) \;=\; \Delta\left(\frac{\Delta^{-1}\,(s_i^{n(t)},\,\alpha^{n(t)})\;\cdot\;(\,n(t')\;-\;1\,)}{n(t)\;-\;1}\right),$$

*Por lo tanto*

$$\begin{aligned}
&TF_{t}^{t'}\,(\Delta\,\left(\frac{\Delta^{-1}\,(s_i^{n(t)},\alpha^{n(t)})\cdot(\,n(t')-1\,)}{n(t)\;-\;1}\right)) = \\
&= \Delta\,\left(\frac{\Delta^{-1}\,(\Delta(\frac{\Delta^{-1}\,(s_i^{n(t)},\,\alpha^{n(t)})\cdot(\,n(t')-1\,)}{n(t)\;-\;1})\cdot(\,n(t')-1\,)}{n(t)\;-\;1}\right) = \\
&= \Delta\,\left(\frac{\Delta^{-1}\,(s_i^{n(t)},\alpha^{n(t)})\cdot(\,n(t')-1\,)\cdot(\,n(t')-1\,)}{(n(t)\;-\;1)\cdot(\,n(t')-1\,)}\right) = \\
&(s_i^{n(t)},\,\alpha^{n(t)})
\end{aligned}$$

**Comentario 5** *En [83] se ha demostrado que las funciones de transformación entre términos lingüísticos de diferentes niveles de una LH se realiza de un modo transparente garantizando que la transformación se realiza sin pérdida de información.*

### c) Proceso Computacional

En esta etapa, como hemos mencionado anteriormente, una vez que la información es expresada en un único dominio de expresión se lleva a cabo el proceso de agregación de la información (ver "Fase de Computación" en la Figura 5.3). La utilización de las jerarquías lingüísticas nos permite realizar los procesos de unificación de la información lingüística y computación con palabras sin pérdida de información utilizando el modelo de representación de información lingüística difusa 2-tupla [81][82].

En la Figura 5.3 se muestra el proceso de CW con LH, desde la fase inicial donde los expertos utilizan un conjunto de términos lingüísticos definido en múltiples escalas hasta la expresión de los resultados en el dominio de

información que cada experto ha utilizado en el proceso de decisión. Estos resultados obtenidos en el proceso computacional pueden ser expresados en cualquier conjunto de términos lingüísticos del dominio de expresión de un modo preciso por medio de la función de transformación $TF_t^t$ mostrada en la Ecuación (5.2).

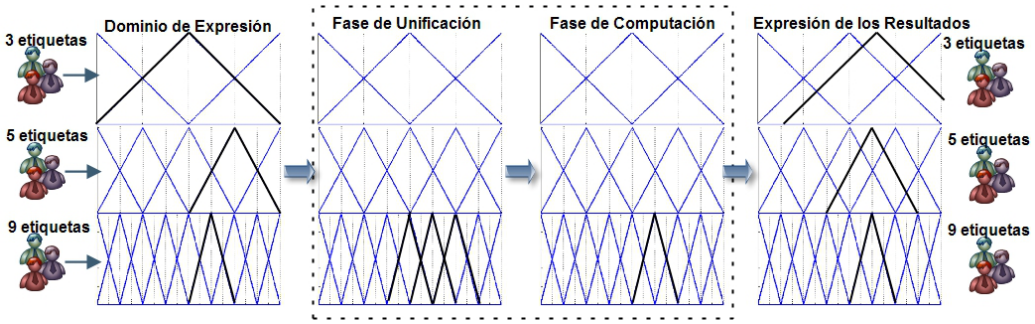



Figura 5.3: Proceso Computación con Palabras.

En la fase de computación se lleva a cabo el proceso de agregación sobre 2-tupla usando alguno de los diferentes operadores que han sido propuestos [51][80][81][92][156][158][160][161][179][189]. La utilización particular de uno de ellos depende de las características propias del problema de decisión a resolver.

### 5.1.2. Jerarquías Lingüísticas Extendidas

Los expertos que participan de un proceso de decisión definido con múltiples escalas lingüísticas esperan un dominio de expresión flexible donde puedan utilizar cualquier conjunto de términos lingüísticos para expresar sus preferencias. También esperan que los resultados obtenidos sean precisos y que puedan ser expresados en el mismo dominio que ellos han utilizado para dar sus preferencias de manera que sean fácilmente comprensibles.

Con las LH no se pueden manejar dominios de expresión con conjuntos de términos con 3, 5 y 7 ó 5, 7 y 9 etiquetas lingüísticas. Esto se debe a la restricción impuesta en la regla de construcción de una LH.

Por lo tanto, para satisfacer las necesidades anteriores y lograr vencer la restricción impuesta por las LH mostrada anteriormente, en [56] se presentan las Jerarquías Lingüísticas Extendidas que están basadas en las LH [83] y en el modelo de representación 2-tupla [81] como vemos a continuación.

**a) Dominio de Expresión.**

La definición del dominio de expresión de la ELH se basa en la LH aunque no impone las limitaciones de conjuntos de etiquetas a usar que fueron definidas con las reglas 1 y 2 de construcción de las LH.

Por lo tanto, y debido al hecho de que en nuestra propuesta queremos manejar cualquier escala lingüística, vamos revisar el proceso de construcción de una ELH. Dicho proceso consiste en definir reglas de construcción extendidas basadas en las reglas básicas de las LH que obligan a mantener los puntos modales de un nivel, $t$, al siguiente nivel, $t+1$. Estas reglas extendidas con las siguientes:

- **Regla Extendida 1.** Deberemos incluir un número finito de niveles ordenados por su cardinalidad, $l(t, n(t))$, con $t = 1, \ldots, m$ que define el dominio de expresión lingüístico multigranular, $F_{MS}$, requerido por los expertos para expresar sus preferencias. Cada nivel es denotado por $l(t, n(t))$ donde,
  - $t$ es el número que indica el nivel de la jerarquía.
  - $n(t)$ es la granularidad del conjunto de términos lingüísticos del nivel $t$.

Note que en este conjunto de niveles no es necesario guardar los puntos modales de un nivel a otro.

- **Regla Extendida 2.** Para obtener una Jerarquía Lingüística Extendida, se agrega un nuevo nivel, $l(t^*, n(t^*))$ con $t^* = m + 1$ $(n(m+1) > n(m))$, tal que mantenga todos los puntos modales de los niveles previos $l(t, n(t))$, con $t = \{1, \ldots, m\}$. Este nuevo nivel debe tener la siguiente granularidad:

$$n(t^*) = (LCM(n(1) - 1, ..., n(m) - 1)) + 1 \tag{5.3}$$

siendo LCM el operador de Mínimo Común Múltiplo.

Este nivel se utilizará únicamente para procesos de computación. Mientras que los resultados de dichas operaciones se expresarán en un nivel anterior $t = 1, \ldots, m$.

Es decir, primero se deben fijar las $m$ escalas lingüísticas dadas a los expertos para expresar sus preferencias, luego se añade un nuevo nivel $l(t^*, n(t^*))$ con $t^* = m + 1$ de acuerdo a la Ecuación (5.3).

Por lo tanto, una Jerarquía Lingüística Extendida es la unión de todos los niveles requeridos por los expertos más el nuevo nivel $l(t^*, n(t^*))$ que mantiene todos los puntos formales para proporcionar un modo preciso a la hora de realizar los procesos de computación con palabras.

$$ELH = \bigcup_{t=1}^{t=m+1} (l(t, n(t)))$$

$S^{n(t)}$ indica el conjunto de términos lingüísticos correspondiente al nivel $t$ cuya granularidad es $n(t)$: $\{S_0^{n(t)}, \ldots, S_{n(t)-1}^{n(t)}\}$.

**Ejemplo 4** *Debido a la flexibilidad en la construcción de la ELH, en las Figuras 5.4 y 5.5 mostramos el uso de 2 dominios de expresión que no son posibles obtenerlos con las LH debido a la restricción impuesta en su construcción. Con las ELH esta restricción se flexibiliza a través del nuevo nivel* $l(t^*, n(t^*))$ *permitiendo que los procesos de unificación de la información y computación se realicen sin pérdida de información.*

- *En la Figura 5.4 la ELH tiene los siguientes niveles:* $l(1,3), l(2,5)$ *y* $l(3,7)$ *más el nuevo nivel* $l(t^*, n(t^*)) = l(4,13)$.

- *En la Figura 5.5 la ELH tiene los siguientes niveles:* $l(1,5), l(2,7)$ *y* $l(3,9)$ *más el nuevo nivel* $l(t^*, n(t^*)) = l(4,25)$.

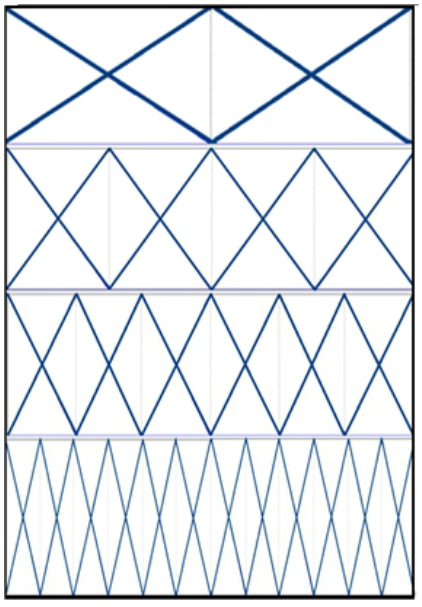


Figura 5.4: ELH con 3, 5 y 7 Etiquetas Lingüísticas.

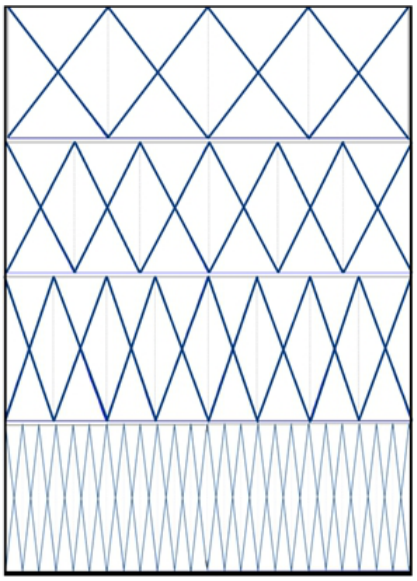


Figura 5.5: ELH con 5, 7 y 9 Etiquetas Lingüísticas.

**b) Proceso de Unificación.**

Tal como hemos visto en el enfoque de las LH, en el esquema computacional de las ELH también es necesario unificar la información lingüística multigranular en un único conjunto de expresión. Este proceso de unificación está basado en las funciones de transformación definidas en las jerarquías lingüísticas, $TF^t_{t'}$, donde $t$ y $t'$ podían ser cualquier nivel de la LH. Sin embargo, en las ELH no se mantienen todos los puntos modales de un nivel a otro y, por lo tanto, no se garantiza la precisión en la transformación de las etiquetas pertenecientes a distintos niveles, salvo el último nivel, $t^*$, que guarda todos los puntos modales de los demás niveles.

Por tanto, la información se unifica en el nivel $t^*$ y se realiza por medio de la función de transformación genérica $TF^a_b$ expresada en la Definición 22. En este sentido y de acuerdo a la Ecuación (5.4), inicialmente se lleva a cabo una fase de unificación en $b = t^*$ y los cálculos se realizan en este nivel de la ELH.

Esta fase se realiza para que puedan hacerse los cálculos computacionales en $t^*$ de un modo preciso sin pérdida de información. Posteriormente, los resultados pueden expresarse en cualquier nivel de la ELH, $t = \{1, \ldots, m\}$, según sea necesario para mejorar la comprensión de los mismos.

**Definición 22** *Sean* $S^{n(a)} = \{s_0^{n(a)}, ..., s_{n(a)-1}^{n(a)}\}$ *y* $S^{n(b)} = \{s_0^{n(b)}, ..., s_{n(b)-1}^{n(b)}\}$ *dos conjuntos de términos lingüísticos, con* $a \neq b$. *La función de transformación lingüística entre ambos está definida de la siguiente manera:*

$$\begin{aligned} TF_b^a : \overline{S}^{n(a)} &\rightarrow \overline{S}^{n(b)} \\ TF_b^a\,(s_j^{n(a)}\,,\,\alpha_j^{n(a)}) &= \Delta\left(\frac{\Delta^{-1}(s_j^{n(a)},\alpha^{n(a)})\cdot(\,n(b)-1\,)}{n(a)\,-\,1}\right) \\ &= (s_k^{n(b)}\,,\,\alpha_k^{n(b)}) \end{aligned} \tag{5.4}$$

**C) Proceso Computacional.**

Al igual que con las LH, el modelo computacional usado por las Jerarquías Lingüísticas Extendidas es el modelo computacional 2-tupla. Aquí un aspecto muy importante es el dominio de expresión de los resultados. Debemos notar que aunque los resultados obtenidos están expresados por medio de 2-tuplas en $S^{n(t^*)}$, con $t^* = m + 1$, este modelo proporciona la posibilidad de expresar los resultados obtenidos en cualquier conjunto de términos lingüísticos contenido en el dominio de expresión sin pérdida de información, por medio de la función de transformación expresada en la Definición 22. En este sentido la función $TF_t^{t^*}$, puede verse como $t = b = \{1, \ldots, m\}$ y $t^* = a = m + 1$ (ver Ecuación (5.4)).

**Teorema 1** *Se asume que* $t$ *y* $t'$ *pueden ser cualquier par de conjuntos de términos en ELH y* $t^*$ *es el nivel* $l(t^{m+1}, n(t^{m+1}))$ *en ELH, la nueva función*

*de transformación extendida $ETF_{t'}^{t}$ está definida de la siguiente manera:*

$$ETF_{t'}^{t} : l(t, n(t)) \rightarrow l(t', n(t'))$$
$$ETF_{t'}^{t} = TF_{t^*}^{t} \circ TF_{t'}^{t^*}$$

*donde $TF_{t^*}^{t}$ y $TF_{t'}^{t^*}$ son funciones de transformación basadas en el modelo 2-tupla de acuerdo a la Ecuación (5.4).*

Este teorema nos indica que los resultados pueden ser expresados en cualquier nivel $t$ de la ELH de un modo preciso sin pérdida de información usando la Ecuación (5.4) para mejorar el entendimiento de los resultados, si fuese necesario.

Con el objeto de resumir los enfoques que hemos revisado para manejar ILM, en la Tabla 5.2 mostramos un análisis comparativo de ellos en base a los siguientes criterios:

- **Dominio de Expresión.** Este criterio está referido al conjunto de términos lingüísticos que pueden pertenecer al dominio de expresión en el cual los expertos expresan sus preferencias.

- **Modelo Computacional.** Este criterio está relacionado al modo en que se realizan los procesos de computación con palabras.

- **Precisión de Cálculo.** Este criterio corresponde a la precisión en los cálculos y la posible pérdida de información en ellos.

- **Dominio de Expresión de los Resultados.** Es el dominio de expresión de los resultados finales obtenidos con el proceso computacional.

| Criterios | LH | ELH |
|---|---|---|
| Dominio de Expresión | Limitado | Ilimitado |
| Modelo Computacional | 2-tupla | 2-tupla |
| Precisión de Cálculo | Preciso | Preciso |
| Resultados | Etiquetas Lingüísticas | Etiquetas Lingüísticas |

Tabla 5.2: Comparación de Enfoques.

Observamos que ambos enfoques ofrecen un modelo computacional preciso utilizando el modelo computacional de 2-tupla. Además cuentan con la posibilidad de proporcionar los resultados finales en los dominios de expresión usados por los expertos. Sin embargo, las LH presentan un inconveniente importante relacionado a la limitación del dominio de expresión que usan los expertos para expresar sus preferencias. Esto se debe a la restricción en la regla de construcción de las LH. En cambio, en las ELH los expertos pueden utilizar cualquier conjunto de etiquetas lingüísticas para expresar sus preferencias proporcionando una mayor flexibilidad para modelar información lingüística multigranular. Por estos motivos, en la siguiente sección vamos a presentar nuestro modelo de QoS en networking basado en las ELH.

## 5.2. Modelo de QoS en Networking Basado en Análisis de Decisión con Múltiples Expertos

En esta sección presentamos el modelo de análisis de decisión flexible para QoS en networking que hemos denominado QOSAD y el proceso de abstracción que asigna las prioridades al sistema de CT del nivel inferior (ver Figura 5.1).

En la Figura 5.6 mostramos la arquitectura del modelo propuesto, la cual dividimos en dos partes para una mejor comprensión:

- En la parte izquierda mostramos gráficamente el escenario de aplicación de nuestra propuesta. Es decir, una organización con acceso a redes externas en la cual se intenta incrementar su productividad desde el punto de vista de tráfico de networking. El control del tráfico se realiza en el borde de la red LAN (ver *ruteador* en la Figura 5.6). Aquí se lleva a cabo el proceso de construcción del sistema de CT cuya relación con el proceso de AD hemos mostrado en la Sección 3.2 (ver Figura 3.5).

- En la parte derecha mostramos la arquitectura de la propuesta donde abstraemos de la complejidad del nivel inferior a los expertos que participan del proceso de decisión en un nivel superior.

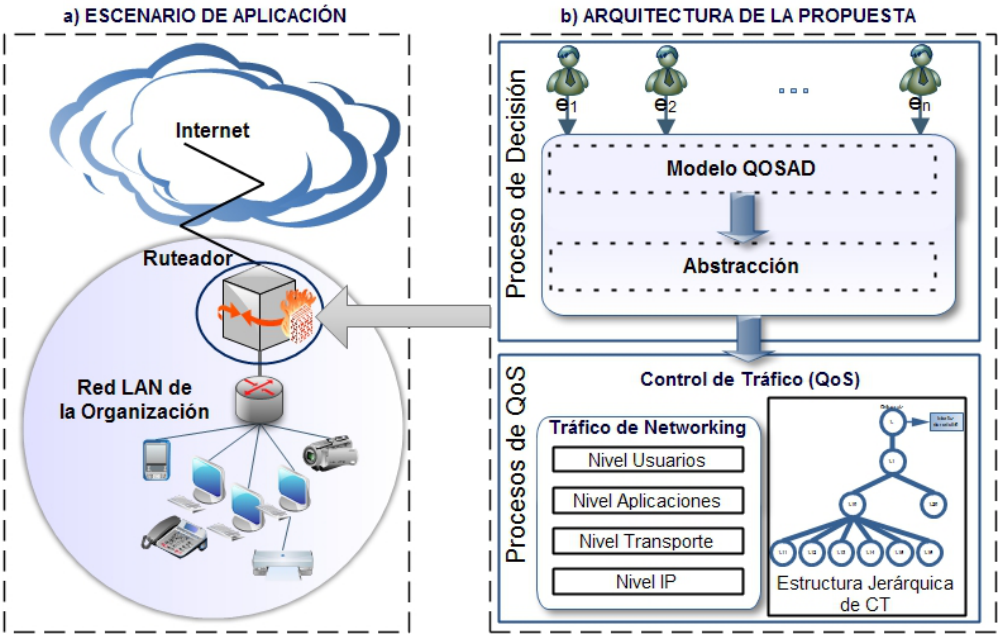



Figura 5.6: Relación entre Escenario y Arquitectura de la Propuesta.

El modelo de decisión es utilizado para asignar prioridades a tipos de tráfico de networking usados en una organización. En él, los expertos, con distintos grados de conocimiento, que participan del proceso de decisión valoran directamente los tipos de tráfico de networking con múltiples escalas lingüísticas para obtener una valoración global de QoS para cada tipo de tráfico.

Para lograr esto, las fases del modelo básico de decisión presentadas en la Sección 3.2 que proponen un esquema general serán adaptadas para nuestros propósitos. Por un lado, es necesario usar en nuestra propuesta las herramientas para representar y manipular información lingüística. Y por otro lado, es necesario que participen del proceso de decisión un conjunto de expertos con la posibilidad de brindar su valoración en conjuntos de etiquetas con diferentes escalas lingüísticas, es decir las ELH. Por lo tanto, haremos unas extensiones al modelo básico para proponer un modelo que satisfaga nuestras necesidades.

Como puede observarse en la Figura 5.7 el modelo de decisión para QoS propuesto consiste básicamente en dos fases:

1. El proceso de análisis de decisión QOSAD donde se obtiene una valoración global para cada alternativa. Esta fase evalúa las alternativas consideradas en el problema y las analiza para obtener una valoración global de QoS para cada una. Luego serán utilizadas para priorización de servicios y tipos de tráfico en networking.

   Básicamente consiste en las siguientes etapas:

   - Definición del marco de trabajo.
   - Recopilación de información.
   - Valoración de las alternativas.

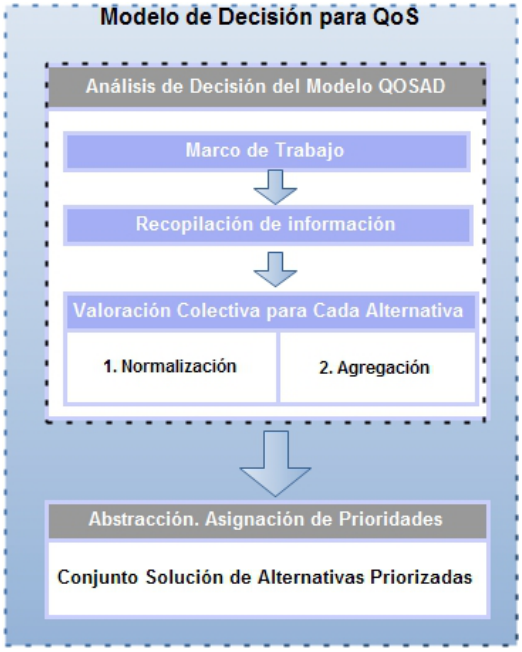



Figura 5.7: Fases del Modelo de Decisión para QoS.

2. El Proceso de abstracción. Consiste en un algoritmo de asignación de prioridades y clasificación de las alternativas en diferentes grupos de tipos de tráfico por nivel de prioridad de acuerdo a los resultados de la fase previa.

En los siguientes apartados revisaremos el modelo de decisión para QoS propuesto con las etapas listadas anteriormente.

### 5.2.1. Definición del Marco de Trabajo

El marco de trabajo determina la estructura y representación de la información. Para ello, como hemos mencionado anteriormente, en nuestro caso es necesario extender el modelo básico de decisión presentado en la Sección

3.2 para que sea capaz de manejar un dominio de expresión con información lingüística multigranular, utilizando Jerarquías Lingüísticas Extendidas.

Además, en esta etapa al igual que en el modelo básico, identificamos y seleccionamos un número finito de expertos $E = \{e_1, \ldots, e_p\}$ que participan del proceso de decisión y un número finito de alternativas $X = \{x_1, \ldots, x_q\}$ o tipos de tráfico de networking. Cada uno de los $p$ expertos expresan sus preferencias para las $q$ alternativas para una organización específica con el objeto de incrementar su productividad en base a sus actividades de networking.

El conjunto de alternativas, $X$, estará formado por los tipos de tráfico de networking utilizados dentro de la organización. Y para mantener un orden respecto al origen de cada tipo de tráfico y un mejor entendimiento del problema, $X$ estará estratificado en capas de acuerdo a su funcionalidad en networking (Ver Figura 5.8) de manera similar a los niveles TCP/IP mostrados en la Figura 2.2. Así, clasificamos a $X$ en los siguientes subconjuntos:

**Alternativas de usuarios o grupos de usuarios (UGA)**: El conjunto de alternativas UGA, $X_{UGA} = \{x_1^{UGA}, \ldots, x_a^{UGA}\}$, corresponde a usuarios o grupos de usuarios que se han sido considerados para que tengan un tratamiento diferenciado de acuerdo a su importancia dentro de la organización.

**Alternativas de capa de aplicación (ALA)**: El conjunto de alternativas ALA, $X_{ALA} = \{x_1^{ALA}, \ldots, x_b^{ALA}\}$, corresponde a aplicaciones específicas que hacen uso de networking y pueden ser identificadas por expresiones regulares de la cabecera de sus protocolos. Un ejemplo típico de este tipo de aplicaciones son los programas peer-to-peer (P2P) que generalmente su tráfico influye en el rendimiento de otros tipos de tráfico por su gran consumo de recursos. También pueden integrar este grupo otro tipo de aplicaciones

como determinados virus, servicios de mensajería, aplicaciones de voz sobre IP, etc.

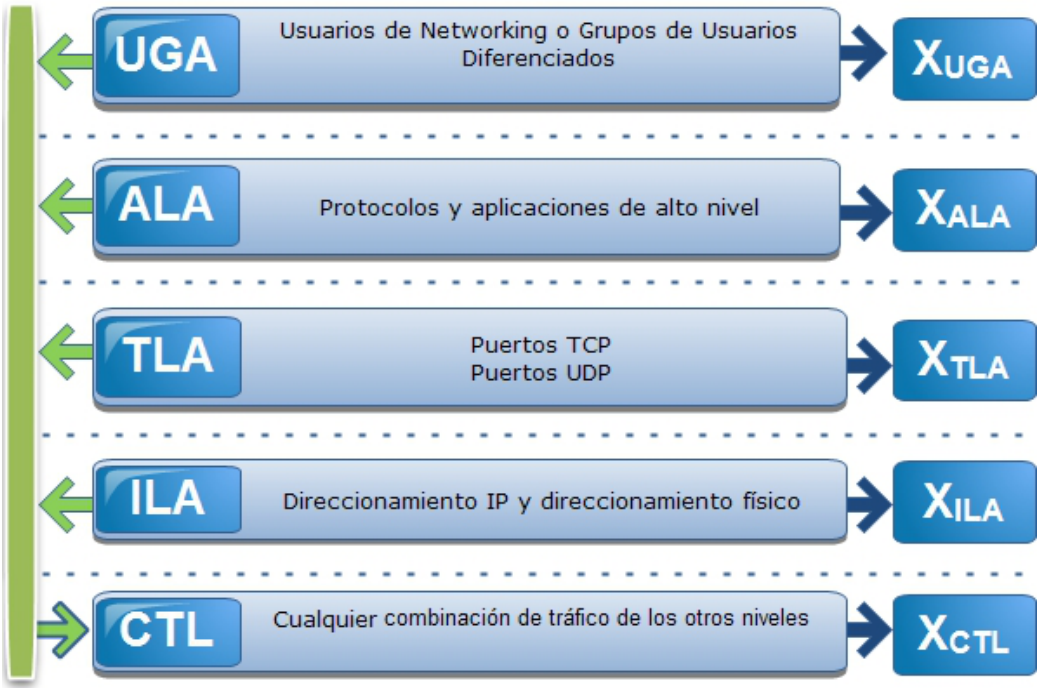



Figura 5.8: Alternativas Divididas en Niveles.

**Aplicaciones de capa de transporte (TLA)**: El conjunto de alternativas TLA, $X_{TLA} = \{x_1^{TLA}, \ldots, x_c^{TLA}\}$ corresponde a servicios que pueden ser identificados por los puertos de los protocolos TCP o UDP. La cantidad de puertos posibles son $2^{16} - 1 = 65535$ y es común que se puedan utilizar rangos de puertos de capa de transporte correspondiente a la pila de protocolos TCP/IP. Algunos de los puertos considerados son *puertos bien conocidos*, de tal manera que su identificación y funcionalidad es conocida aunque esto no ocurre con la mayoría de ellos y dependen del servicio o software que los utilice. Un ejemplo de un puerto bien conocido es el puerto TCP 80 que generalmente utilizan los *navegadores* de internet.

**Alternativas de direccionamiento IP o MAC (ILA)**: El conjunto de alternativas ILA, $X_{ILA} = \{x_1^{ILA}, \ldots, x_d^{ILA}\}$, corresponde al tráfico de capas inferiores (enlace de datos y red) de la pila de protocolos TCP/IP. Los cuales se identifican de acuerdo a su dirección correspondiente.

**Combinación de tráfico de otros niveles (CTL)**: El conjunto de alternativas CTL, $X_{CTL} = \{x_1^{CTL}, \ldots, x_e^{CTL}\}$, está formado por tipos de tráfico correspondientes a una combinación de dos o más tipos tráficos de los conjuntos mencionados anteriormente. Un ejemplo de ello podría ser el tráfico P2P de un usuario determinado.

Cabe destacar que el proceso de identificación de alternativas del modelo de decisión es independiente para cada organización y dependerá del uso de cada tipo de tráfico independientemente de su importancia.

Tal como hemos mencionado en la Sección 2.3.3, este proceso consta de un estudio preliminar por parte del administrador de red acerca de los tipos de tráfico utilizados, los servicios y los usuarios que pueden tener un tratamiento diferenciado. Considerando todos estos aspectos para las alternativas, las posibilidades que surgen son muy numerosas y los administradores deben identificar cuáles tipos de tráfico son los necesarios o relevantes dentro de la organización para que participen del proceso de decisión.

Por lo tanto, el marco de trabajo de nuestro modelo considera que el conjunto de alternativas $X$ está formado por la unión de las diferentes alternativas de cada capa presentada anteriormente:

$$X = \begin{pmatrix} \{x_1^{UGA}, \ldots, x_a^{UGA}\} \\ \{x_1^{ALA}, \ldots, x_b^{ALA}\} \\ \{x_1^{TLA}, \ldots, x_c^{TLA}\} \\ \{x_1^{ILA}, \ldots, x_d^{ILA}\} \\ \{x_1^{CTL}, \ldots, x_e^{CTL}\} \end{pmatrix}$$

siendo $q = a + b + c + d + e$, el número total de alternativas.

**Comentario 6** *Puede darse el caso que para una organización particular alguno de estos subconjuntos de alternativas sea vacío debido a que no necesitan mayor especificidad que la obtenida con los otros conjuntos no vacíos.*

Este marco de trabajo ofrece a los expertos un dominio lingüístico multigranular para expresar sus preferencias ($v_j^i \in S^{n(t_X)}$) sobre las alternativas usando una $ELH$. Siendo $n(t_X)$ la granularidad del conjunto de términos lingüísticos usado por el experto $e_i \in E$ para expresar su preferencia de acuerdo a su grado de conocimiento sobre la alternativa $x_j \in X$.

Por lo tanto, la $ELH$ definida en el marco de trabajo contiene los $m$ conjuntos de términos usados por los expertos para expresar sus preferencias sobre cada alternativa y un nuevo conjunto de términos $S^{n(t^*)} = \{s_0^{n(t^*)}, \ldots, s_{n(t^*)-1}^{n(t^*)}\}$ cuya granularidad esta definida por la Ecuación (5.3). En consecuencia, la $ELH$ asociada el marco de trabajo del modelo de decisión está definido por:

$$ELH = \bigcup_{t=1}^{t=m+1} \begin{Bmatrix} \left\{S_1^{n(t_X)}, .., S_m^{n(t_X)}\right\} \\ \left\{S^{n(t^*)}\right\} \end{Bmatrix}$$

El marco de trabajo que presentamos en esta sección permite que los expertos den sus opiniones en vectores de preferencias donde las valoraciones están

expresadas en distintos conjuntos de términos lingüísticos que deben poder representarse utilizando diferentes niveles de una misma Jerarquía Lingüística Extendida.

Con el objeto de aclarar estos conceptos y mostrar la aplicación del modelo en cada una de las etapas, a lo largo de las próximas secciones vamos a desarrollar un ejemplo ilustrativo básico de nuestra propuesta en un entorno académico universitario.

**Ejemplo 5** ***Uso Básico del Modelo Propuesto.***
*Suponemos un escenario de aplicación universitario típico donde coexisten diferentes tipos de usuarios como profesores, investigadores, alumnos y personal administrativo. Ellos usan una red LAN (con diferentes dispositivos tanto inalámbricos como cableados) que tiene un enlace a Internet por el cual los diversos usuarios utilizan los diferentes servicios que necesitan.*

*Es evidente que las necesidades de uso varían debido a que dependen de diversos factores como tipo de uso de Internet en clases, cantidad de enlaces concurrentes, si hay una videoconferencia, si se utilizan sistemas remotos administrativos, etc. Además, en estas situaciones hay ciertos tipos de tráfico más prioritarios que otros por lo que la demanda descontrolada de recursos puede generar congestión del enlace a Internet y el mal aprovechamiento del mismo. Por lo tanto, ante este escenario, debe haber un control óptimo de los recursos para "garantizar" el tráfico crítico para un entorno académico y que los tipos de tráfico usados puedan ser clasificados y servidos según su importancia. Este proceso de control se puede realizar en los límites de la red interna por lo que el uso de un modelo como QOSAD puede resultar muy beneficioso. En este sentido, los administradores de red, a través de un relevamiento de los registros de networking, han observado, identificado*

*y clasificado los tipos de tráfico utilizados en este entorno académico y se usará el modelo QOSAD para resolver el problema. Para ello, se tienen en cuenta todas las etapas de dicho modelo.*

**1. Marco de Trabajo.**

Vamos a definir un marco de trabajo basado en una ELH con un conjunto de 3 expertos $E = \{e_1, e_2, e_3\}$, que realizan sus valoraciones lingüísticas sobre diferentes tipos de tráfico de networking. Además cada uno de ellos tiene diferente grado de conocimiento o experiencia dentro del entorno académico.

Los niveles 1, 2 y 3 de la ELH se asignan a los expertos $e_1$, $e_2$ y $e_3$ respectivamente (ver Figura 5.4), cuya sintaxis y semántica es la siguiente:

$$
\begin{array}{ll}
e_1 \leftarrow Nivel\,1 & e_2 \leftarrow Nivel\,2 \\
s_0^3 = MB = \ Muy\,Baja\,(0,0,.5) & s_0^5 = MB = \ Muy\,Baja\,(0,0,.25) \\
s_1^3 = M = \ Media\,(0,.5,1) & s_1^5 = B = \ Baja\,(0,.25,.5) \\
s_2^3 = MA = \ Muy\,Alta\,(.5,1,1) & s_2^5 = M = \ Media\,(.25,.5,.75) \\
 & s_3^5 = A = \ Alta\,(.5,.75,1) \\
 & s_4^5 = MA = \ Muy\,Alta\,(.75,1,1)
\end{array}
$$

$$
\begin{array}{l}
e_3 \leftarrow Nivel\,3 \\
s_0^7 = MB = \ Muy\,Baja\,(0,0,.17) \\
s_1^7 = B = \ Baja\,(0,.17,.33) \\
s_2^7 = MoB = \ Moderadamente\,Baja(.17,.33,.5) \\
s_3^7 = M = \ Media\,(.33,.5,.67) \\
s_4^7 = MoA = \ Moderadamente\,Alta\,(.5,.67,.83) \\
s_5^7 = A = \ Alta\,(.67,.83,1) \\
s_6^7 = MA = \ Muy\,Alta\,(.83,.1,1)
\end{array}
$$

| $x_j \leftarrow X_-$ | Alternativas y Descripción |
|---|---|
| $x_1 \leftarrow X_{ALA}$ | **Transferencia de Datos:** Es el tráfico para protocolos que realicen transferencia de datos. |
| $x_2 \leftarrow X_{TLA}$ | **Mensajería:** Es el tráfico para los servicios de mensajería y correo electrónico. |
| $x_3 \leftarrow X_{TLA}$ | **Browsing:** Es el tráfico de los servicios consumidos desde los navegadores de internet. |
| $x_4 \leftarrow X_{ALA}$ | **Multimedia:** Corresponde al tráfico de comunicaciones en tiempo real y videoconferencias. |
| $x_5 \leftarrow X_{UGA}$ | **Investigación:** Es el tráfico destinado a los usuarios de los grupos de investigación académicos. |

Tabla 5.3: Conjunto de Alternativas.

A partir del estudio mencionado los administradores de red proponen utilizar un conjunto de 5 alternativas, $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, cuyas funciones se describen en la Tabla 5.3. En la primera columna se hace la clasificación según su funcionalidad en networking para ser usada por el sistema de CT.

### 5.2.2. Recopilación de Información.

Una vez que el marco de trabajo ha sido fijado, en esta etapa se obtiene la valoración de los expertos para cada una de las alternativas a través de vectores de preferencia. Es decir, cada experto que participa del proceso de decisión expresa sus opiniones que indican la QoS deseada para cada alternativa por medio de un vector de preferencias lingüístico, $V$, valorado en diferentes escalas de la $ELH$.

Sea $V_i = \{v_1^i \dots v_q^i\}$ un vector de preferencias dado por el experto $e_i$ y $v_j^i \in S_r^{n(r)} \in ELH$ su preferencia acerca de la alternativa $x_j$. Siendo $n(r)$ la granularidad del conjunto de términos lingüísticos usada por el experto $e_i \in E$ para expresar dichas preferencias y $r$ indica el nivel de la $ELH$.

Continuando con el ejemplo ilustrativo de la sección anterior (Ejemplo 5), a continuación mostramos los resultados de esta etapa.

**2. Recopilación de Información.**

En esta etapa obtenemos las valoraciones lingüísticas de los expertos en la ELH para cada alternativa. La recopilación de información lingüística se muestra en la Tabla 5.4 donde cada fila corresponde a la valoración lingüística del experto $e_i$ para la alternativa $x_j$.

| $e_i$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | Escala |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $e_1$ | $v_1^1$ =MB | $v_2^1$ =M | $v_3^1$ =M | $v_4^1$ =MA | $v_5^1$ =MA | $S_1^3$ |
| $e_2$ | $v_1^2$ =MB | $v_2^2$ =A | $v_3^2$ =B | $v_4^2$ =MA | $v_5^2$ =A | $S_2^5$ |
| $e_3$ | $v_1^3$ =B | $v_2^3$ =MoA | $v_3^3$ =MoB | $v_4^3$ =A | $v_5^3$ =MA | $S_3^7$ |

Tabla 5.4: Recopilación de la Información.

En la última columna se muestra la escala lingüística usada por cada experto y su nivel correspondiente en la ELH.

### 5.2.3. Valoración de las Alternativas.

En esta fase, los vectores de preferencia proporcionados de acuerdo a las opiniones individuales de los expertos se agregan para obtener una valoración global de QoS para cada alternativa evaluada.

Como hemos visto, un término lingüístico puede transformarse a una 2-tupla lingüística añadiéndole el valor 0 como traslación simbólica, $s_i \in S \equiv (s_i, 0) \in \overline{S}$. Esto nos permite realizar los cálculos computacionales. Por lo tanto, primero la información lingüística es transformada a 2-tuplas

lingüísticas usando la función de transformación $H$:

$$H : S_r^{n(r)} \rightarrow \overline{S}_r^{n(r)}$$

donde,

$$\overline{v}_j^i = H(v_j^i) = (v_j^i, 0) \in \overline{S}_r^{n(r)}$$

siendo $H(v_j^i) = (v_j^i, 0)$ la valoración de la alternativa $x_j$ expresada por el experto $e_i \in E$ en el modelo de representación de información lingüística difusa 2-tupla y $n(r)$ la granularidad del conjunto de términos lingüísticos del nivel $r$ de la $ELH$ usada por dicho experto.

Posteriormente, la información en 2-tuplas deberá ser transformada en un mismo dominio de expresión. Debido a este hecho, el proceso para obtener una valoración global se lleva a cabo en dos pasos:

1. **Unificación de la información lingüística multigranular.** Una vez que la información lingüística es expresada en 2-tuplas, todas las preferencias lingüísticas dadas por los expertos en sus respectivos dominios de expresión son transformadas en un único dominio lingüístico. Es decir, todas las preferencias dadas por los expertos en diferentes escalas de una $ELH$ son transformadas en un único dominio de expresión, $t^*$. Para lograr esto, se aplica la función de transformación $TF_{t^*}^t$ de acuerdo Ecuación (5.4) de la siguiente manera:

   $$TF_{t^*}^t : \overline{S}^{n(t)} \rightarrow \overline{S}^{n(t^*)}$$

   donde,

   $$TF_{t^*}^t(\overline{v}_j^i) = \overline{v}_j^{i^*} = (s_k^{n(t^*)}, \alpha_k) \in \overline{S}^{n(t^*)}$$

2. **Agregación de la información.**

   Luego de ser unificada, la información de entrada está expresada mediante 2-tuplas en $\overline{S}^{n(t^*)}$. Esto permite llevar a cabo el proceso de agregación de la información para obtener la valoración global de QoS, $v(x_j)$, para cada alternativa, $x_j$, agregando la valoración individual de cada experto en $\overline{S}^{n(t^*)}$ de acuerdo a la siguiente función:

$$AO_X^w : \left(\overline{S}^{n(t^*)}\right)^p \rightarrow \overline{S}^{n(t^*)}$$

$$v(x_j) = AO_X^w(\overline{v}_j^{1^*}, \overline{v}_j^{2^*}, ..\overline{v}_j^{p^*}) \in \overline{S}^{n(t^*)}$$

   Siendo $AO^w$ el operador de agregación usado para combinar la información provista por los $p$ expertos acerca de la alternativa $x_j$ y $w$ el vector de pesos asociado.

La decisión del operador de agregación a utilizar juega un rol importante en todo proceso de toma de decisión. Diferentes operadores han sido propuestos para agregar información a través del modelo de representación lingüística 2-tupla que pueden ser utilizados [51][80][81][92][156][158][160][161][179][189]. Sin embargo, debido a las características del problema a resolver, en el modelo propuesto vamos a trabajar con operadores ponderados ya que consideramos que en este problema puede ser necesario usar operadores basados en pesos debido a que coexisten en el proceso de decisión expertos con diferente grado de conocimiento técnico y estratégico a los que se podría ponderar adecuadamente.

Algunos de estos operadores son el promedio ponderado, el promedio ponderado lingüístico [81] u operadores basados en OWA [81] [92] sobre 2-tupla (ver Definiciones 15, 16, 17 y 18) donde se pueden usar cuantificadores

lingüísticos difusos para calcular los vectores de pesos [169][173]. En este sentido, en el ***Anexo B*** hacemos una revisión de los cuantificadores lingüísticos difusos y prestamos atención al proceso de obtención de los pesos del operador OWA usando un cuantificador lingüístico difuso relativo.

Continuando con el Ejemplo 5, aquí describimos la etapa mostrada anteriormente.

**3. Valoración de Alternativas.**

Inicialmente debemos expresar las valoraciones lingüísticas de la etapa previa como 2-tupla (ver Tabla 5.5). Posteriormente, realizamos los siguiente pasos:

| $e_i$ | $\overline{v}_1^i$ | $\overline{v}_2^i$ | $\overline{v}_3^i$ | $\overline{v}_4^i$ | $\overline{v}_5^i$ | Escala |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $e_1$ | $(s_0^3, 0)$ | $(s_1^3, 0)$ | $(s_1^3, 0)$ | $(s_2^3, 0)$ | $(s_2^3, 0)$ | $S_1^3$ |
| $e_2$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_3^5, 0)$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_4^5, 0)$ | $(s_3^5, 0)$ | $S_2^5$ |
| $e_3$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_2^7, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $S_3^7$ |

Tabla 5.5: Transformación de la Información Lingüística a 2-tupla.

**3.1 Unificación de la Información.** Los resultados del proceso de unificación de la información lingüística multigranular pueden verse en la Tabla 5.6.

| $e_i$ | $\overline{v}_1^{i*}$ | $\overline{v}_2^{i*}$ | $\overline{v}_3^{i*}$ | $\overline{v}_4^{i*}$ | $\overline{v}_5^{i*}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $e_1$ | $(s_0^{13}, 0)$ | $(s_6^{13}, 0)$ | $(s_6^{13}, 0)$ | $(s_{12}^{13}, 0)$ | $(s_{12}^{13}, 0)$ |
| $e_2$ | $(s_0^{13}, 0)$ | $(s_9^{13}, 0)$ | $(s_3^{13}, 0)$ | $(s_{12}^{13}, 0)$ | $(s_9^{13}, 0)$ |
| $e_3$ | $(s_2^{13}, 0)$ | $(s_8^{13}, 0)$ | $(s_4^{13}, 0)$ | $(s_{10}^{13}, 0)$ | $(s_{12}^{13}, 0)$ |

Tabla 5.6: Unificación de la Información Lingüística Multigranular en $t^* = 4$

**3.2 Agregación de la Información.**

Para obtener el vector de valoraciones globales de QoS de las alternativas debemos utilizar un operador de agregación sobre 2-tupla. En este ejemplo,

por razones de espacio y simplicidad vamos a usar el operador de agregación de media ponderada (ver Definición 15) cuyos resultados pueden verse en la Tabla 5.7. El vector de pesos es el siguiente: $w = (.3; .3; .4)$.

| . | $v(x_1)$ | $v(x_2)$ | $v(x_3)$ | $v(x_4)$ | $v(x_5)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Valoración Global en $S^{13}$ | $(s_1^{13}, -.2)$ | $(s_8^{13}, -.3)$ | $(s_4^{13}, .3)$ | $(s_{11}^{13}, .2)$ | $(s_{11}^{13}, .1)$ |

Tabla 5.7: Agregación de la Información.

### 5.2.4. Proceso de Asignación de Prioridades.

El proceso de decisión de QOSAD intenta definir un orden de las alternativas de acuerdo a su importancia o prioridad dentro de la organización. A partir de ahí, en esta fase definimos un algoritmo para llevar a cabo un proceso de asignación de prioridades a cada uno de los tipos de tráfico (alternativas) evaluados en la fase previa.

Así, a cada alternativa, $x_j$, se asignará una prioridad $p_t^o$ de acuerdo a su valoración global de QoS, $v(x_j)$, por medio de un algoritmo de clasificación que está basado en distancias entre Números Difusos Triangulares (NDT). Este algoritmo permite hacer una representación transparente del proceso de abstracción de los niveles operativos (ver Figura 5.1) entre cada alternativa y cada prioridad usada en el problema.

Al finalizar el algoritmo, se obtiene la asignación de las alternativas o tipos de tráfico, de acuerdo a medidas de distancias, con las prioridades del sistema de QoS y concluye con la construcción de la estructura jerárquica de CT.

Para llevar adelante esta idea, primero debemos definir un vector de prio-

ridades, $P^o = \{p_1^o, .., p_k^o\}$, que se utilizará en el sistema de CT. Dicho vector representa la cantidad de prioridades que se van a considerar por el sistema de CT en la organización $o$. Es importante destacar que cada organización puede tener diferentes necesidades en cuanto al número de prioridades a implementar con el sistema de CT, es por este motivo que flexibilizamos el algoritmo para que este dato no sea fijo y que cada organización *ingrese* su vector de prioridades al sistema.

Hasta ahora hemos utilizado información lingüística para representar la información de nuestra propuesta, por lo que también resulta adecuado, para este tipo de problemas, utilizar las prioridades como conjuntos de términos lingüísticos, $S^P$. Por lo tanto vamos a considerar un vector de prioridades lingüísticos, $P^o = \{p_1^o, .., p_k^o\}$, para la organización $o$ que representa lingüísticamente dichas prioridades.

Por ejemplo, el vector de prioridades podría ser el siguiente (aunque depende de cada organización):

$$P^o \in S^p = \{p_1^o, p_2^o, p_3^o, p_4^o, p_5^o\} \begin{cases} p_1^o = s_0^5 = MB = \ Muy\, Baja\, (0, 0, .25) \\ p_2^o = s_1^5 = B = \ Baja\, (0, .25, .5) \\ p_3^o = s_2^5 = M = \ Media\, (.25, .5, .75) \\ p_4^o = s_3^5 = A = \ Alta\, (.5, .75, 1) \\ p_5^o = s_4^5 = MA = \ Muy\, Alta\, (.75, 1, 1) \end{cases}$$

Para clarificar esta idea, en la Figura 5.9 mostramos un ejemplo del proceso de asignación de prioridades con tipos de tráfico genéricos. Supongamos que tenemos 7 tipos de tráfico cuyo valor global de QoS, obtenido en la etapa de

*agregación*, es el siguiente:

$$(v(x_h), v(x_i), v(x_y), v(x_l), v(x_m), v(x_n), v(x_q))$$

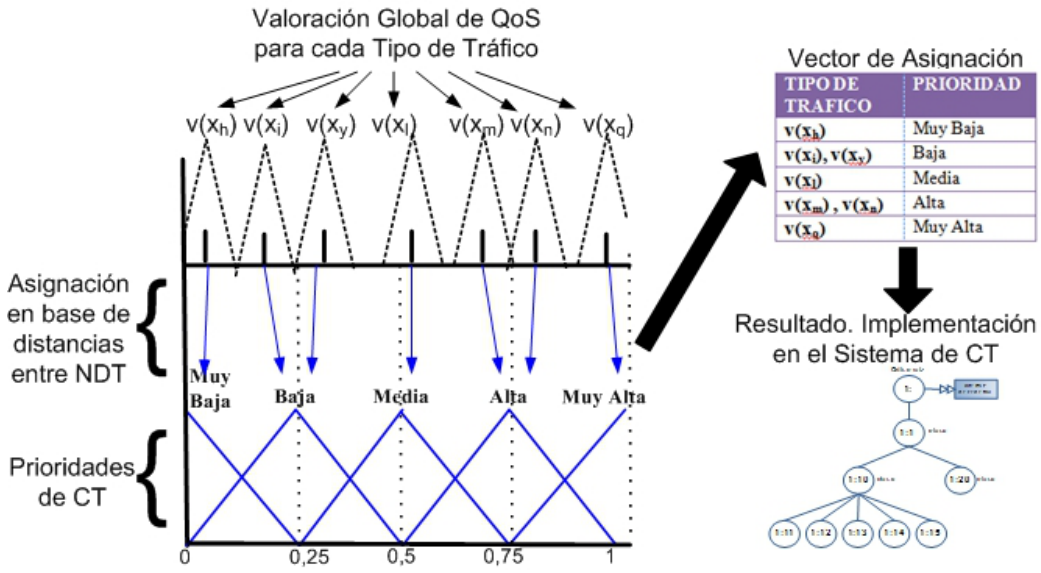



Figura 5.9: Proceso de Abstracción y Asignación de Prioridades.

Estos valores están representados gráficamente en la parte superior de dicha figura como NDT. En la parte inferior de la Figura 5.9 está representado el vector de prioridades de la organización $o$, $P^o \in S^p$. Con estos valores, el proceso de asignación se realiza en base a distancias entre los NDT del vector $P^o \in S^p$ y las valoraciones globales de QoS.

Los resultados son presentados en un vector de asignación que tiene la distancia difusa más pequeña entre cada par de valores $p_t^o$ y $v(x_j)$. Posteriormente, el algoritmo sugiere como resultado la estructura jerárquica de configuración de CT para su implementación como se observa en la parte

derecha de la Figura 5.9.

Para calcular las distancias entre cada valor de $P^o \in S^p$ y $v(x_j)$ podemos utilizar diferentes medidas de distancias como la distancia Euclídea [122]. Sin embargo, en nuestro modelo para calcular las distancias entre valoraciones globales de QoS, $v(x_j)$, y prioridades lingüísticas proponemos utilizar medidas de distancias entre NDT basadas en la distancia de Minkowski.

**Definición 23** *[67] Sean* $\bar{y} = (y_1, y_2, y_3)$ *y* $\bar{n} = (n_1, n_2, n_3)$ *dos números difusos triangulares, la distancia de Minkowski está definida como sigue:*

$$d_p(\bar{y}, \bar{n}) = \sqrt[p]{(1/3)(|y_1 - n_1|^p + |y_2 - n_2|^p + |y_3 - n_3|^p)}, \tag{5.5}$$

*donde* $p \geq 1$ *es un parámetro de distancia.*

Note que la distancia de Minkowski mostrada en la Ecuación (5.5) es una distancia de promedio ponderado y podemos enunciar las siguientes propiedades:

- Si dos números difusos triangulares $\bar{y} = (y, y, y)$ y $\bar{n} = (n, n, n)$ son números reales, entonces la distancia de Minkowski, $d_p(\bar{y}, \bar{n})$, es idéntica a la distancia Euclídea $d_p(\bar{y}, \bar{n}) = |y - n|$.
- Dos números difusos triangulares $\bar{y} = (y, y, y)$ y $\bar{n} = (n, n, n)$ son idénticos si la distancia de Minkowski $d_p(\bar{y}, \bar{n}) = 0$.
- Sean $\bar{y}$, $\bar{n}$ y $\bar{k}$ números difusos triangulares, $\bar{n}$ es más cercano a $\bar{y}$ que $\bar{k}$ solamente si $d_p(\bar{y}, \bar{n}) \leq d_p(\bar{y}, \bar{k})$

La Ecuación (5.5) puede tener diferentes formas:

Para $p = 1$ puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$d_1(\bar{y}, \bar{n}) = (1/3)(|y_1 - n_1| + |y_2 - n_2| + |y_3 - n_3|), \tag{5.6}$$

siendo la distancia de Hamming.

Para $p = 2$ puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$d_2(\bar{y}, \bar{n}) = \sqrt{(1/3)(|y_1 - n_1|^2 + |y_2 - n_2|^2 + |y_3 - n_3|^2)}, \tag{5.7}$$

siendo la distancia Euclídea.

Por lo tanto, con el objeto de formalizar el proceso de abstracción entre los niveles funcionales descritos anteriormente (ver Figura 5.1) y detallar el proceso de asignación de prioridades, definimos el Algoritmo 1.

Con las líneas 2 y 3 indicamos que se leen las valoraciones globales de QoS para cada alternativa calculada en la fase previa y se ingresa el conjunto de prioridades $p_t^o \in P^o$ a tener en cuenta en el sistema de CT para la organización $o$ como Números Difusos Triangulares.

En la línea 4 las valoraciones globales de QoS obtenidas en la fase previa son transformadas a un nivel, $t^c$, del conjunto de términos lingüísticos original en $ELH = \bigcup_{t=1}^{t=m} \left\{ S_1^{n(t_X)}, .., S_m^{n(t_X)} \right\}$ y asignadas a un vector $V^C$ que contiene todas las alternativas con su valor global de QoS. Este tarea es útil para mostrar los resultados a cada experto en el mismo dominio que él ha expresado sus preferencias.

Hasta aquí tenemos dos conjuntos de números difusos triangulares, el primero pertenece al conjunto de prioridades $p_t^o \in P^o$ y el segundo pertenece a

las valoraciones globales en algún dominio de expresión inicial de los expertos $V^C(x_j)$.

***Algoritmo 1. Abstracción y Asignación de Prioridades.***

1. **function** ABSTRACCION();

2. **load** $(v(x_j))$;

3. **input** $(P^o = \{p_1^o = (a^{p_1}, b^{p_1}, c^{p_1}), .., p_k^o = (a^{p_k}, b^{p_k}, c^{p_k})\})$;

4. **do** $V^C \leftarrow TF_{t^C}^{t^*}(v(x_j))$;

5. **for each** $v^C(x_j) \in V^C$ **do**

6. **for each** $p_t^o \in P^o$ **do**

7. $VectorDistancia \leftarrow CalcularDistancia(p_t^o, v^C(x_j))$;

8. **end for each**

9. $VectorDeAsignacion \leftarrow min(\$VectorDistancia)$;

10. **end for each**

11. **do** ConstruirArbolDeCT($VectorDeAsignacion)

12. **end function**

Luego desde la línea 5 a 9, primero calculamos la distancia entre cada par $p_t^o$ y $v^C(x_j)$ y la asignamos a un vector de distancias (*$VectorDistancia*). Luego, construimos un vector que contiene cada prioridad relacionada con las alternativas cuya distancia entre ambas es mínima. Es decir que calculamos la distancia entre NDT más corta y al resultado lo asignamos al vector *$VectorDeAsignación*.

En la Tabla 5.8 mostramos un resultado genérico del vector *$VectorDeAsignación* donde para cada prioridad en $p_t^o \in P^o$ puede haber un conjunto de alternativas $\{V^C(x_r^{p_1}), \ldots, V^C(x_z^{p_q})\}$.

Por último, en la línea 11 se construye el árbol jerárquico de prioridades en el sistema de CT según *$VectorDeAsignación* y se presentan los resultados.

**Comentario 7** *Un ejemplo completo de este modelo se puede ver en el Capítulo 6 donde mostramos un caso de estudio real implementado y los resultados que obtuvimos.*

| Prioridad | Alternativas |
|---|---|
| $p_1^o$ | $\{V^C(x_r^{p_1}), \ldots, V^C(x_z^{p_1})\}$ |
| $p_2^o$ | $\{V^C(x_r^{p_2}), \ldots, V^C(x_z^{p_2})\}$ |
| ... | ... |
| $p_q^o$ | $\{V^C(x_r^{p_q}), \ldots, V^C(x_z^{p_q})\}$ |

Tabla 5.8: Vector de Asignación de Prioridades.

Continuando con el Ejemplo 5, aquí mostramos los resultados obtenidos en la etapa final de la propuesta.

**4. Abstracción.**

Habiendo obtenido los valores globales de QoS para cada una de las alternativas, en este paso usamos esos valores para asignarlos a una prioridad en el sistema de CT. Para ello, en el sistema de CT académico de nuestro ejemplo consideramos un conjunto formado por 5 prioridades, $P_t^o$, que están expresadas en NDT como sigue:

$$p_1^o = s_0^5 = MB = \ Muy\, Baja\, (0, 0, .25)$$
$$p_2^o = s_1^5 = B = \ Baja\, (0, .25, .5)$$
$$p_3^o = s_2^5 = M = \ Media\, (.25, .5, .75)$$
$$p_4^o = s_3^5 = A = \ Alta\, (.5, .75, 1)$$
$$p_5^o = s_4^5 = MA = \ Muy\, Alta\, (.75, 1, 1)$$

| Prioridad | Alternativas |
|---|---|
| $p_1^o$ | $x_1$ |
| $p_2^o$ | $x_3$ |
| $p_3^o$ | $\emptyset$ |
| $p_4^o$ | $x_2$ |
| $p_5^o$ | $x_4,\ x_5$ |

Tabla 5.9: Asignación de Prioridades.

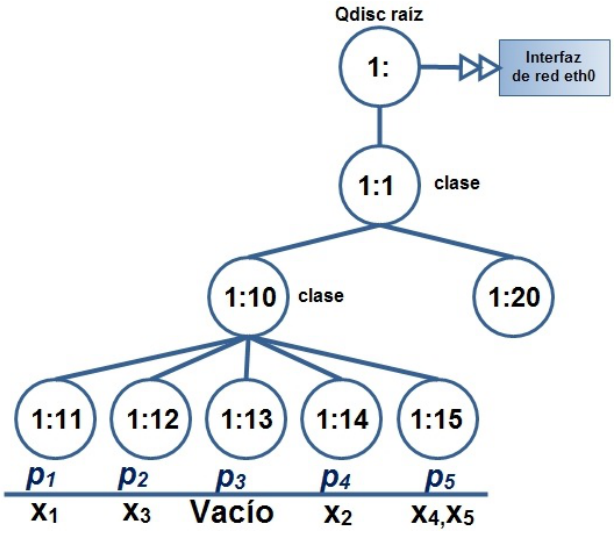



Figura 5.10: Estructura de Implementación del Ejemplo 5.

En la Tabla 6.8 se muestran los resultados obtenidos del proceso de asignación de prioridades para cada tipo de tráfico de acuerdo al Algoritmo 1. Aquí se ve que los tipos de tráfico de los usuarios del grupo de *investigación* y *multimedia* tienen la mayor prioridad para el sistema de CT. Luego, los

servicios de *mensajería*, *browsing* y *transferencia de datos* se clasifican en orden decreciente de importancia con su prioridad correspondiente.

Finalmente, se propone la configuración del sistema de control de tráfico para este escenario como se muestra en la Figura 5.10.

## Capítulo 6

# Implementación del Modelo en un Caso de Estudio Real

Con el objeto de mostrar los beneficios del modelo propuesto en esta memoria de investigación, en este capítulo exponemos un caso de estudio real incluyendo su implementación basada en software libre. Aquí se tienen en cuenta todas las fases del modelo (ver Figura 5.7) hasta llegar a una implementación práctica en un organismo del estado provincial llamado Administración Provincial del Agua (APA).

La actividad principal de la APA es la gestión de los recursos hídricos provinciales los cuales incluyen proyectos, obras, regulación de los recursos hídricos, monitoreo, emergencias por sequías, emergencias por inundaciones e informes sobre tales recursos, entre otros. Para realizar estas funciones, el edificio principal consta de un ambiente de trabajo en red que conecta a todas las áreas de la organización.

La red de datos actual de la APA cuenta con aproximadamente 300 dispositivos que hacen uso de la propia red local e internet (el resumen puede

verse en la Tabla 6.1). Estos dispositivos están conectados entre sí mediante cableado estructurado y mediante 4 redes inalámbricas internas para equipos portátiles y dispositivos que cuenten con esta tecnología. Dichos dispositivos (computadoras personales, notebooks, impresoras, cámaras IP, y smartphones) comparten información y recursos conformando la red LAN de APA.

| **Tipo de Organización** | Organismo del Estado Provincial | |
|---|---|---|
| **Dispositivos de red** | Áreas Administrativas | Aprox. 120 |
| | Áreas Técnicas | Aprox. 100 |
| | Inalámbrico | Aprox. 80 |
| **Sitio Web** | www.apa.gov.ar | |
| | www.chaco.gov.ar/apa | |

Tabla 6.1: Características de la Organización. Caso de Estudio

A su vez, la red LAN se conecta a Internet y a otras redes gubernamentales a través de una puerta de enlace (RSOL) que físicamente es un servidor con el Sistema Operativo Linux cuya función principal es de *ruteador de borde*, es decir, conecta la red LAN con redes externas, por lo que es apto implementar en él mecanismos de QoS con un sistema de CT. En la Figura 6.1 puede observarse, de un modo básico, el esquema lógico de conectividad mencionado para nuestro caso de estudio.

En cuanto a su funcionamiento, la APA y otras organizaciones hacen uso de diversos sistemas informáticos y bases de datos provinciales que se encuentran centralizados, es decir que físicamente se encuentran alejados del edificio central de la APA y se accede a ellos a través de redes externas e internet. A esto se le suma el uso cotidiano de diferentes servicios de internet y de aplicaciones nacionales.

Un aspecto problemático diario se origina cuando algunos servicios críticos se ven afectados en su rendimiento por otros servicios de menor impor-

tancia disminuyendo la productividad del organismo, esto se debe al gran número de usuarios de red en combinación con la cantidad de aplicaciones externas e internet y la falta de control de los mismos.

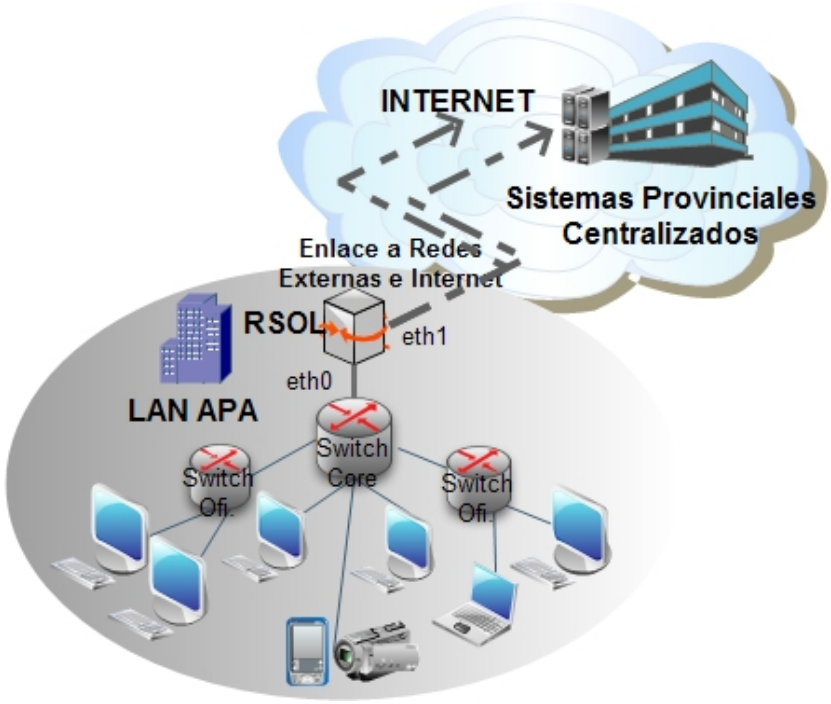



Figura 6.1: Esquema de Red del Caso de Estudio Real.

Un ejemplo de ello es una situación que se origina habitualmente en la segunda quincena de cada mes cuando se utiliza un sistema denominado PON (Planta Orgánica Nominal) que tiene la función de realizar las liquidaciones de sueldos de los empleados provinciales a nivel general. Este sistema tiene servidores centralizados que gestionan los cientos de miles empleados provinciales y sus actividades como recurso humano provincial. Para que en APA se pueda hacer uso del sistema y cargar novedades mensuales se accede a un servidor de aplicaciones remoto compartido por todos los organismos provinciales. Esto genera una carga extra de recursos debido al tráfico interactivo

propio del sistema y a la cantidad de datos que se pueden transmitir, por lo que si no se le da la prioridad necesaria a este tipo de tráfico se pierden las conexiones continuamente. Esta situación genera retrasos que pueden repetirse para otros sistemas informáticos e incluso para los servicios de internet.

Por lo tanto, es necesario contar con un mecanismo para gestionar de la mejor manera los recursos de networking teniendo en cuenta los siguientes propósitos:

- Mejorar la productividad de la organización definiendo un ordenamiento de los tipos de tráfico utilizados de manera que el tráfico menos importante no influya en el tráfico crítico para la APA.
- Mejorar la percepción del servicio a nivel general por parte del usuario de red sobre el rendimiento del mismo.
- Incluir en el proceso de decisión sobre QoS a diversos usuarios que conocen o trabajan transversalmente en la organización.

Un administrador de red puede llevar adelante estas tareas con su propia visión del problema. Sin embargo, como hemos visto, pueden participar del proceso diversos expertos o usuarios de la red que interpreten qué servicios, aplicaciones o usuarios son más importantes y en qué grado de importancia utilizando palabras del lenguaje natural. Esto da una fortaleza adicional al modelo debido a que en el proceso participan expertos que conocen a la organización y se abstraen de la problemática o complejidad de la implementación de QoS.

Habiendo detallado algunas de las características principales de la organización de nuestro caso de estudio real, en las siguientes secciones presentamos

los resultados del modelo propuesto para este particular caso de estudio. Comenzamos describiendo los valores obtenidos en cada una de las etapas del modelo de análisis de decisión. Posteriormente, mostramos la asignación de los resultados al sistema de control de tráfico implementado.

## 6.1. Análisis de Decisión del Modelo QOSAD

El estudio previo de la organización en base a actividades de networking nos ha permitido llevar adelante el modelo propuesto, por lo que en los siguientes apartados mostramos los resultados de cada una de las etapas de análisis de decisión del modelo QOSAD (ver Figura 5.7).

### 6.1.1. Definición del Marco de Trabajo

Esta es la primera etapa del modelo y consiste en definir el dominio de expresión usado por cada experto que va a participar del proceso de decisión. Es decir, definir los conjuntos de términos lingüísticos que se asignan a cada uno de los expertos para expresar sus preferencias sobre las alternativas respecto a su grado de conocimiento o experiencia. Para ello, definimos un marco de trabajo basado en el dominio de expresión utilizado por las Jerarquías Lingüísticas Extendidas.

Inicialmente, fue necesario identificar y seleccionar, de acuerdo al estudio de la organización, el conjunto de alternativas o tipos de tráfico usados en la organización. Posteriormente, se seleccionaron los expertos que participaron del proceso de decisión.

**Selección de Alternativas.**

En nuestro caso de estudio contamos con una organización que tiene una estructura orgánica dividida en funciones técnicas y funciones administrativas las cuales tienen trabajos muy diferenciados. En la primera, las áreas están encargadas de realizar proyectos, obras, control de ejecución, mantenimiento, informes meteorológicos, informes fluviales, asistencia ante eventualidades climáticas, laboratorio químico de análisis, etc.

En la segunda, se encargan de la gestión administrativa (compras, licitaciones, bienes, biblioteca, asesoría legal, etc.) y de recursos humanos de toda la organización. A partir de las actividades sobre su estructura se han identificado diferentes tipos de tráfico que son utilizados por todas las áreas en la organización y que son útiles en las funciones diarias de los empleados, independientemente de la frecuencia de uso de cada uno de ellos. Por lo tanto, el conjunto de alternativas tiene diversos orígenes según los tipos de tráfico a considerar y su estructura funcional.

En primer lugar, identificamos los accesos a servicios y aplicaciones de red como conexiones a bases de datos remotas y sistemas informáticos con algún tipo de conexión remota que son utilizados por los empleados en sus tareas diarias. El resultado fue el siguiente:

- **Sistema de Mesa de Entradas,** $x_1$**.** Utilizado para el registro y seguimiento centralizado de documentación interna y externa del estado provincial.
- **Sistema de Compras y Patrimonio,** $x_2$**.** Estos sistemas se utilizan para registro compras como licitaciones y seguimiento patrimonial de los bienes de uso y consumo provinciales.

- **Sistema Financiero Contable (SAFYC),** $x_3$**.** Sistema centralizado utilizado para presupuesto, gestión de cuentas, auditorías contables, proveedores y pagos.

- **Pagos Electrónicos de Tesorería,** $x_4$**.** Es el envío diario de lotes de depósitos o transferencias bancarias como pago a proveedores o empleados a través de home banking.

- **Gobierno Electrónico,** $x_5$**.** Son el conjunto de servicios web al ciudadano como guía de trámites, información meteorológica, hidrometeorológica, fluvial, informes sobre alertas climáticas, altura de los ríos, noticias, educación, etc.

- **Sistema de Planta Orgánica Nominal,** $x_6$**.** Es el sistema de seguimiento de novedades de personal y liquidación de sueldos provincial.

- **Protocolo de transferencia de Archivos (FTP),** $x_7$**.** Este sistema se utiliza para enviar datos o actualizaciones referentes a gobierno electrónico.

- **Protocolo de Transferencia Simple de Mail (SMTP),** $x_8$**.** Utilizado para envío de e-mails oficiales.

- **Protocolo de Oficina Postal (POP3),** $x_9$**.** Utilizado para recepción de e-mails oficiales.

- **Navegación web (HTTP),** $x_{10}$**.** Corresponde a la utilización de internet a través de navegadores o browsers. Se destaca que contamos con un filtro de sitios no permitidos, por lo que esta alternativa conforma sitios únicamente no filtrados.

- **Audio y Vídeo en Línea,** $x_{11}$**.** Corresponde al Streaming oficial de gobierno a través de noticias y publicaciones periódicas.

- **Redes Sociales,** $x_{12}$**.** Se hace referencia a la utilización particular de redes sociales a través de navegadores.

- **Mensajería,** $x_{13}$**.** Corresponde al uso de dos servicios principales de mensajería permitidos (Messenger y Gtalk). Se destaca que el edificio central está alejado del centro de la ciudad por lo que este servicio puede ser útil para el trabajo diario y conexión con proveedores.

- **Vídeo Vigilancia Externa,** $x_{14}$**.** Corresponde al tipo de tráfico relacionado con el vídeo de las cámaras de vigilancia para monitorizar algunas eventualidades que pudieran ocurrir.

- **Servidor de GPS,** $x_{15}$**.** La APA cuenta con un sistema de posicionamiento global (GPS) de referencia continua para mejorar la precisión georeferenciada de los usuarios de GPS normales.

- **Sistema de Información Geográfico (SIG) de la Organización,** $x_{16}$**.** Corresponde al tráfico generado para el servidor de mapas provincial y local.

Además se diferenciaron algunos grupos de usuarios con trabajos comunes que deben tener un tratamiento separado del resto de los usuarios debido a que realizan tareas con algún nivel de importancia.

- **Departamento de Liquidación de Sueldos,** $x_{17}$**.** En determinadas situaciones el sistema utilizado suele tener dificultades de comunicación como el mencionado en el ejemplo anterior.

- **Departamento de Estudios Hídricos,** $x_{18}$**.** Este departamento tiene un destacado contacto con redes externas nacionales y eventualmente se accede a una base de datos binacional de tele-medición para contar con mediciones y estadísticas hídricas.

- **Directivos,** $x_{19}$**.** Independientemente del servicio que utilicen los directivos se ha solicitado que cuenten con un tipo de servicio diferenciado.

El reordenamiento técnico de referencia de las alternativas según el nivel de implementación es el siguiente (Ver Figura 5.8):

$$X = \begin{pmatrix} X_{UGA} = \{x_{17}^{UGA}, x_{18}^{UGA}, x_{19}^{UGA}\} \\ X_{ALA} = \{x_{11}^{ALA}, x_{13}^{ALA}\} \\ X_{TLA} = \{x_{7}^{TLA}, x_{8}^{TLA}, x_{9}^{TLA}, x_{10}^{TLA}\} \\ X_{ILA} = \{x_{1}^{ILA}, x_{2}^{ILA}, x_{3}^{ILA}, x_{6}^{ILA}, x_{15}^{ILA}\} \\ X_{CTL} = \{x_{4}^{CTL}, x_{5}^{CTL}, x_{12}^{CTL}, x_{14}^{CTL}, x_{16}^{CTL}\} \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, el conjunto de alternativas es el siguiente:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \ldots, x_{19}\}$$

**Identificar y seleccionar a los expertos que participan en el proceso de decisión.**

Hemos seleccionado cuatro técnicos en informática que trabajan en mantenimiento de las computadoras, reparaciones y problemas menores que pudieran tener todos los usuarios de la red. Un jefe de departamentos administrativos, un jefe de departamentos técnicos y el administrador de redes del organismo, siendo un total de siete expertos.

El motivo de la selección se debe a que trabajan a diario en coordinación con todas las áreas y conocen sobre las necesidades y usos de red que tienen los empleados. Debido a su interacción diaria con todo el personal, éstos tienen un conocimiento general de toda la organización y podrían valorar qué servicios y qué usuarios tienen mayor o menor importancia y en qué grado (utilizando términos lingüísticos cercanos al lenguaje natural) sin que por ello sea necesario que tengan un conocimiento de administración de redes, ruteadores, QoS, protocolos, etc. Por estas razones, ellos forman el conjunto de expertos seleccionados para nuestro caso de estudio:

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7\}$$

**Jerarquía Lingüística Extendida a usar.**

Se fijan 3 conjuntos de términos lingüísticos para valorar cada alternativa $x_j$ por cada experto $e_i$ (cada experto deberá valorar en base a su preferencia a cada servicio de red y la prioridad que el experto espera de estos servicios atendiendo a los objetivos propuestos), cuya sintaxis y semántica es la siguiente (ver Figura 6.2):

- En el nivel 1 de la ELH los expertos 1 y 2 utilizan un conjunto de términos lingüísticos con 5 etiquetas lingüísticas, ya que son los expertos con menor conocimiento:

$$s_0^5 = MB = \ Muy\, Baja\, (0, 0, .25)$$
$$s_1^5 = B = \ Baja\, (0, .25, .5)$$
$$s_2^5 = M = \ Media\, (.25, .5, .75)$$
$$s_3^5 = A = \ Alta\, (.5, .75, 1)$$
$$s_4^5 = MA = \ Muy\, Alta\, (.75, 1, 1)$$

- En el nivel 2 de la ELH los expertos 3, 4 y 5 utilizan un conjunto de términos lingüísticos con 7 etiquetas lingüísticas:

$$
\begin{aligned}
s_0^7 &= MB = \ Muy\, Baja\,(0, 0, .17)\\
s_1^7 &= B = \ Baja\,(0, .17, .33)\\
s_2^7 &= MoB = \ Moderadamente\, Baja(.17, .33, .5)\\
s_3^7 &= M = \ Media\,(.33, .5, .67)\\
s_4^7 &= MoA = \ Moderadamente\, Alta\,(.5, .67, .83)\\
s_5^7 &= A = \ Alta\,(.67, .83, 1)\\
s_6^7 &= MA = \ Muy\, Alta\,(.83, .1, 1)
\end{aligned}
$$

- En el nivel 3 de la ELH los expertos 6 y 7 utilizan un conjunto de términos lingüísticos con 9 etiquetas lingüísticas:

$$
\begin{aligned}
s_0^9 &= MB = \ Muy\, Baja\,(0, 0, .12)\\
s_1^9 &= B = \ Baja\,(0, .12, .25)\\
s_2^9 &= MoB = \ Moderadamente\, Baja(.12, .25, .37)\\
s_3^9 &= MeB = \ Media\, a\, Baja\,(.25, .37, .5)\\
s_4^9 &= M = \ Media\,(.37, .5, .62)\\
s_5^9 &= MeA = \ Media\, a\, Alta\,(.5, .62, .75)\\
s_6^9 &= MoA = \ Moderadamente\, Alta\,(.62, .75, .87)\\
s_7^9 &= A = \ Alta\,(.75, .87, 1)\\
s_8^9 &= MA = \ Muy\, Alta\,(.87, .1, 1)
\end{aligned}
$$

Por lo tanto la ELH está formada por los 3 niveles anteriores más el nivel $l(t^*, S^{n(t^*)}) = l(4, 25)$ obtenido de acuerdo a la Ecuación (5.3).

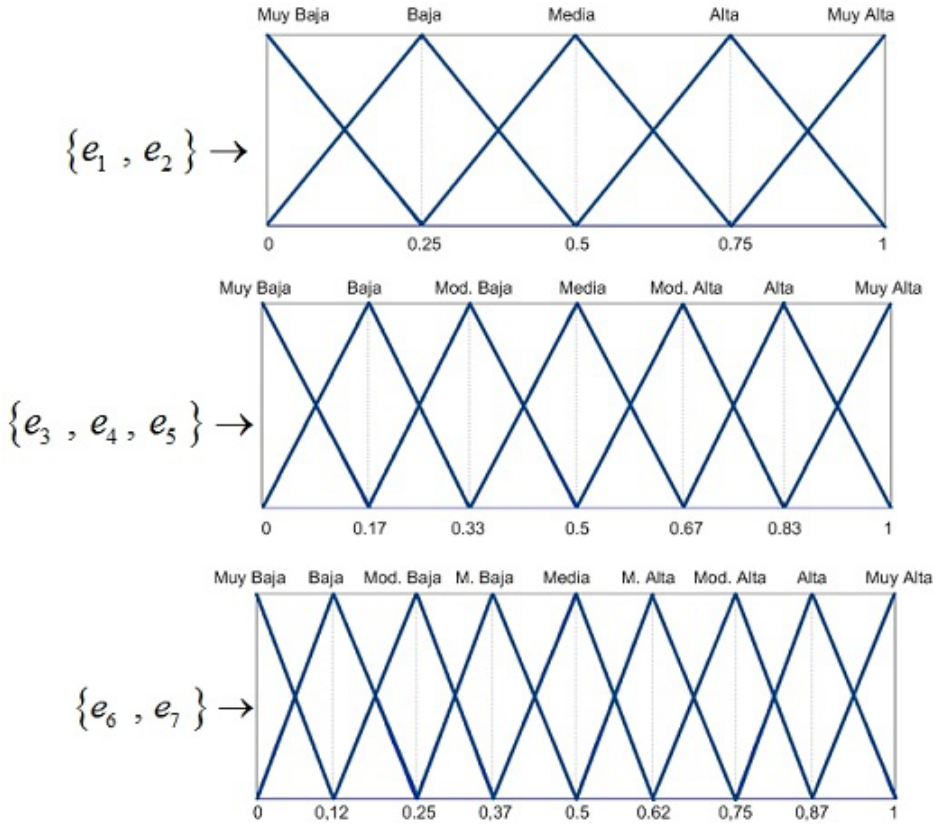



Figura 6.2: Conjunto de Etiquetas Asignadas a los Expertos.

$$
\begin{aligned}
l(1,5) &\quad \{s_0^5, s_1^5, s_2^5, s_3^5, s_4^5\} \\
l(2,7) &\quad \{s_0^7, s_1^7, s_2^7, s_3^7, s_4^7, s_5^7, s_6^7\} \\
l(3,9) &\quad \{s_0^9, s_1^9, s_2^9, s_3^9, s_4^9, s_5^9, s_6^9, s_7^9, s_8^9\} \\
l(4,25) &\quad \{s_0^{25}, s_1^{25}, s_2^{25}, s_4^{25}, s_5^{25} \ldots, s_{21}^{25}, s_{22}^{25}, s_{23}^{25}, s_{24}^{25}\}
\end{aligned}
$$

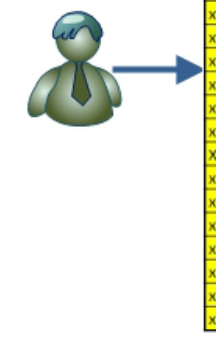
### 6.1.2. Recopilación de Información

La etapa de recopilación de información de los expertos que participan del proceso de decisión se ha realizado en plantillas de valoración adaptadas al nivel de conocimiento o experiencia de cada uno de ellos asignándole distintos

conjuntos de términos lingüísticos. Un ejemplo de ello puede verse en las Figuras 6.3, 6.4 y 6.5.

| | Muy Baja | Baja | Media | Alta | Muy Alta |
|---|---|---|---|---|---|
| x1. Sistema de Mesa de Entradas | | | | | ■ |
| x2. Sistema de Compras y Patrimonio | | | ■ | | |
| x3. SAFYC | | | | | ■ |
| x4. Pagos Electrónicos de Tesorería. | | | | ■ | |
| x5. Gobierno Electrónico. | | ■ | | | |
| x6. Sistema de Personal | | | | ■ | |
| x7. Transferencia de Archivos. | ■ | | | | |
| x8. Transferencia de Mail. | | | ■ | | |
| x9. Recpeción de Mail. | | | ■ | | |
| x10. Navegación web. | | ■ | | | |
| x11. Audio y video en Línea. | ■ | | | | |
| X12. Redes Sociales | ■ | | | | |
| x13. Mensajería. | ■ | | | | |
| x14. Video Vigilancia externa | | ■ | | | |
| x15. Servidor de GPS | | | | ■ | |
| x16. SIG APA | | | | | ■ |
| x17. Departamento de Liquidación de Sueldos | | | | ■ | |
| x18. Departamento de Estudios Hídricos | | ■ | | | |
| x19. Directivos | | | ■ | | |

Figura 6.3: Opinión de $e_1$ en la Plantilla de Recopilación de Información con 5 Etiquetas Lingüísticas.




| | Muy Baja | Baja | Mod. Baja | Media | Mod. Alta | Alta | Muy Alta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x1. Sistema de Mesa de Entradas | | | | ■ | | | |
| x2. Sistema de Compras y Patrimonio | | | | | | | ■ |
| x3. SAFYC | | | | | | | ■ |
| x4. Pagos Electrónicos de Tesorería. | | | | | | | ■ |
| x5. Gobierno Electrónico. | | | | | | ■ | |
| x6. Sistema de Personal | | | | | | | ■ |
| x7. Transferencia de Archivos. | | | | ■ | | | |
| x8. Transferencia de Mail. | | | | | ■ | | |
| x9. Recpeción de Mail. | | | | | ■ | | |
| x10. Navegación web. | | | | | | | ■ |
| x11. Audio y video en Línea. | | ■ | | | | | |
| X12. Redes Sociales | | ■ | | | | | |
| x13. Mensajería. | | | | ■ | | | |
| x14. Video Vigilancia externa | | | | | | | ■ |
| x15. Servidor de GPS | | | | | | ■ | |
| x16. SIG APA | | | | | | ■ | |
| x17. Departamento de Liquidación de Sueldos | | | | | | | ■ |
| x18. Departamento de Estudios Hídricos | | | | | | ■ | |
| x19. Directivos | | | | | | ■ | |

Figura 6.4: Opinión de $e_3$ en la Plantilla de Recopilación de Información con 7 Etiquetas Lingüísticas.

Para cada uno de los expertos se procedió a explicar las características, en un aspecto no técnico y amigable, de los diferentes tipos de tráfico que conforman las alternativas del problema mencionando claramente el objetivo de proceso de decisión.

Además, se ha prestado especial atención en no influir en la decisión de cada uno de ellos sino de explicar en detalle para qué se utiliza cada tipo de tráfico dentro de la organización y cómo contribuye a las funciones diarias. Este fue un aspecto clave del proceso de recopilación de información.

Sin embargo, los expertos estaban en conocimiento de los problemas propios o de terceros respecto a cada tipo de tráfico que se habían presentado. El resultado puede verse en la Tabla 6.2.

Figura 6.5: Opinión de $e_6$ en la Plantilla de Recopilación de Información con 9 Etiquetas Lingüísticas.

| | $e_1$ | $e_2$ | $e_3$ | $e_4$ | $e_5$ | $e_6$ | $e_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_1$. | $v_1^1 = MA$ | $v_1^2 = M$ | $v_1^3 = M$ | $v_1^4 = M$ | $v_1^5 = MoB$ | $v_1^6 = MoA$ | $v_1^7 = A$ |
| $x_2$. | $v_2^1 = M$ | $v_2^2 = B$ | $v_2^3 = MA$ | $v_2^4 = M$ | $v_2^5 = MoB$ | $v_2^6 = MeA$ | $v_2^7 = MoA$ |
| $x_3$. | $v_3^1 = MA$ | $v_3^2 = M$ | $v_3^3 = MA$ | $v_3^4 = MoA$ | $v_3^5 = MoA$ | $v_3^6 = A$ | $v_3^7 = MoA$ |
| $x_4$. | $v_4^1 = A$ | $v_4^2 = A$ | $v_4^3 = MA$ | $v_4^4 = A$ | $v_4^5 = MoA$ | $v_4^6 = MA$ | $v_4^7 = MA$ |
| $x_5$. | $v_5^1 = B$ | $v_5^2 = B$ | $v_5^3 = A$ | $v_5^4 = MoB$ | $v_5^5 = M$ | $v_5^6 = B$ | $v_5^7 = M$ |
| $x_6$. | $v_6^1 = A$ | $v_6^2 = A$ | $v_6^3 = MA$ | $v_6^4 = B$ | $v_6^5 = M$ | $v_6^6 = MeB$ | $v_6^7 = MoA$ |
| $x_7$. | $v_7^1 = MB$ | $v_7^2 = MB$ | $v_7^3 = M$ | $v_7^4 = MB$ | $v_7^5 = B$ | $v_7^6 = MB$ | $v_7^7 = B$ |
| $x_8$. | $v_8^1 = M$ | $v_8^2 = MB$ | $v_8^3 = MoA$ | $v_8^4 = B$ | $v_8^5 = M$ | $v_8^6 = M$ | $v_8^7 = B$ |
| $x_9$. | $v_9^1 = M$ | $v_9^2 = MB$ | $v_9^3 = MoA$ | $v_9^4 = MoB$ | $v_9^5 = M$ | $v_9^6 = M$ | $v_9^7 = B$ |
| $x_{10}$. | $v_{10}^1$ =B | $v_{10}^2 = M$ | $v_{10}^3 = MA$ | $v_{10}^4 = B$ | $v_{10}^5 = B$ | $v_{10}^6 = MoB$ | $v_{10}^7 = MoB$ |
| $x_{11}$. | $v_{11}^1 = MB$ | $v_{11}^2 = MB$ | $v_{11}^3 = B$ | $v_{11}^4 = MB$ | $v_{11}^5 = MB$ | $v_{11}^6 = MB$ | $v_{11}^7 = MB$ |
| $x_{12}$. | $v_{12}^1 = MB$ | $v_{12}^2 = MB$ | $v_{12}^3 = B$ | $v_{12}^4 = MB$ | $v_{12}^5 = B$ | $v_{12}^6 = B$ | $v_{12}^7 = M$ |
| $x_{13}$. | $v_{13}^1 = MB$ | $v_{13}^2 = A$ | $v_{13}^3 = M$ | $v_{13}^4 = M$ | $v_{13}^5 = B$ | $v_{13}^6 = M$ | $v_{13}^7 = M$ |
| $x_{14}$. | $v_{14}^1 = B$ | $v_{14}^2 = MA$ | $v_{14}^3 = MA$ | $v_{14}^4 = MoA$ | $v_{14}^5 = A$ | $v_{14}^6 = MeA$ | $v_{14}^7 = MoA$ |
| $x_{15}$. | $v_{15}^1 = A$ | $v_{15}^2 = M$ | $v_{15}^3 = A$ | $v_{15}^4 = A$ | $v_{15}^5 = MoA$ | $v_{15}^6 = MoA$ | $v_{15}^7 = MA$ |
| $x_{16}$. | $v_{16}^1 = MA$ | $v_{16}^2 = MA$ | $v_{16}^3 = A$ | $v_{16}^4 = MA$ | $v_{16}^5 = MoA$ | $v_{16}^6 = MeA$ | $v_{16}^7 = MA$ |
| $x_{17}$. | $v_{17}^1 = A$ | $v_{17}^2 = B$ | $v_{17}^3 = MA$ | $v_{17}^4 = MoA$ | $v_{17}^5 = A$ | $v_{17}^6 = MA$ | $v_{17}^7 = A$ |
| $x_{18}$. | $v_{18}^1 = B$ | $v_{18}^2 = B$ | $v_{18}^3 = A$ | $v_{18}^4 = MoA$ | $v_{18}^5 = M$ | $v_{18}^6 = MeA$ | $v_{18}^7 = MoA$ |
| $x_{19}$. | $v_{19}^1 = M$ | $v_{19}^2 = MA$ | $v_{19}^3 = A$ | $v_{19}^4 = MoA$ | $v_{19}^5 = MoA$ | $v_{19}^6 = MoA$ | $v_{19}^7 = MoA$ |

Tabla 6.2: Valoraciones Lingüísticas Expresadas por los Expertos.

### 6.1.3. Valoración de las Alternativas

Una vez que los expertos expresaron sus opiniones en términos lingüísticos para todas las alternativas involucradas en el proceso, éstas son expresadas mediante el modelo 2-tuplas como se observa en la Tabla 6.3 de vectores de preferencias. Cada valor de la Tabla 6.3 representa la valoración lingüística del experto $e_i$ sobre la alternativa $x_j$ en $\overline{S}_r^{n(r)}$ mediante el modelo representación lingüística 2-tupla.

**1. Unificación de la información lingüística multigranular.**

De acuerdo a la Ecuación (5.4) se representa la información en un único dominio lingüístico de $ELH$ en el nivel $t^*$ para poder realizar los cálculos computacionales. Para cada uno de los valores de la Tabla 6.3 aplicamos la función de transformación $TF_{t^*}^t : \overline{S}^{n(t)} \rightarrow \overline{S}^{n(t^*)}$. El resultado obtenido puede observarse en la Tabla 6.4. Luego de ser unificada, la información de entrada está expresada mediante 2-tupla en $\bar{S}^{n(t*)}$.

| | $\bar{v}_j^1$ | $\bar{v}_j^2$ | $\bar{v}_j^3$ | $\bar{v}_j^4$ | $\bar{v}_j^5$ | $\bar{v}_j^6$ | $\bar{v}_j^7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | $(s_4^5, 0)$ | $(s_2^5, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_2^7, 0)$ | $(s_6^9, 0)$ | $(s_7^9, 0)$ |
| $x_2$ | $(s_2^5, 0)$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_2^7, 0)$ | $(s_5^9, 0)$ | $(s_6^9, 0)$ |
| $x_3$ | $(s_4^5, 0)$ | $(s_2^5, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_7^9, 0)$ | $(s_6^9, 0)$ |
| $x_4$ | $(s_3^5, 0)$ | $(s_3^5, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_8^9, 0)$ | $(s_8^9, 0)$ |
| $x_5$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_2^7, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_1^9, 0)$ | $(s_4^9, 0)$ |
| $x_6$ | $(s_3^5, 0)$ | $(s_3^5, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_3^9, 0)$ | $(s_6^9, 0)$ |
| $x_7$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_0^7, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_0^9, 0)$ | $(s_1^9, 0)$ |
| $x_8$ | $(s_2^5, 0)$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_4^9, 0)$ | $(s_1^9, 0)$ |
| $x_9$ | $(s_2^5, 0)$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_2^7, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_4^9, 0)$ | $(s_1^9, 0)$ |
| $x_{10}$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_2^5, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_2^9, 0)$ | $(s_1^9, 0)$ |
| $x_{11}$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_0^7, 0)$ | $(s_0^7, 0)$ | $(s_0^9, 0)$ | $(s_0^9, 0)$ |
| $x_{12}$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_0^7, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_1^9, 0)$ | $(s_4^9, 0)$ |
| $x_{13}$ | $(s_0^5, 0)$ | $(s_3^5, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_1^7, 0)$ | $(s_4^9, 0)$ | $(s_4^9, 0)$ |
| $x_{14}$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_4^5, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_5^9, 0)$ | $(s_4^9, 0)$ |
| $x_{15}$ | $(s_3^5, 0)$ | $(s_2^5, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_6^9, 0)$ | $(s_8^9, 0)$ |
| $x_{16}$ | $(s_4^5, 0)$ | $(s_4^5, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_5^9, 0)$ | $(s_8^9, 0)$ |
| $x_{17}$ | $(s_3^5, 0)$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_6^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_8^9, 0)$ | $(s_7^9, 0)$ |
| $x_{18}$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_1^5, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_3^7, 0)$ | $(s_5^9, 0)$ | $(s_6^9, 0)$ |
| $x_{19}$ | $(s_2^5, 0)$ | $(s_4^5, 0)$ | $(s_5^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_4^7, 0)$ | $(s_6^9, 0)$ | $(s_6^9, 0)$ |

Tabla 6.3: Vectores de Preferencia en 2-tupla.

| | $\bar{v}_j^{1*}$ | $\bar{v}_j^{2*}$ | $\bar{v}_j^{3*}$ | $\bar{v}_j^{4*}$ | $\bar{v}_j^{5*}$ | $\bar{v}_j^{6*}$ | $\bar{v}_j^{7*}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $x_1$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_8^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{21}^{25}, 0)$ |
| $x_2$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_8^{25}, 0)$ | $(s_{15}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ |
| $x_3$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{21}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ |
| $x_4$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ |
| $x_5$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_8^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_3^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ |
| $x_6$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_9^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ |
| $x_7$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_3^{25}, 0)$ |
| $x_8$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_3^{25}, 0)$ |
| $x_9$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_8^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_3^{25}, 0)$ |
| $x_{10}$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_6^{25}, 0)$ |
| $x_{11}$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ |
| $x_{12}$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_3^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ |
| $x_{13}$ | $(s_0^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_4^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ |
| $x_{14}$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_{15}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ |
| $x_{15}$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ |
| $x_{16}$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{15}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ |
| $x_{17}$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{21}^{25}, 0)$ |
| $x_{18}$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_6^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{15}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ |
| $x_{19}$ | $(s_{12}^{25}, 0)$ | $(s_{24}^{25}, 0)$ | $(s_{20}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{16}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ | $(s_{18}^{25}, 0)$ |

Tabla 6.4: Unificación de la Información Lingüística Multigranular en $\overline{S}^{n(t^*)}$.

**2. Agregación de la Información.**

Con el objeto de obtener la valoración global de QoS, $v_j$, para cada alternativa, $x_j$, llevamos a cabo el proceso de agregación en 2-tupla.

Para este caso de estudio hemos tenido en cuenta el operador de agregación OWA en 2-tupla (ver Definición 17) utilizando un cuantificador lingüístico difuso relativo de "*mayoría*" para obtener el vector de pesos $w_i$, siendo el resultado el siguiente:

$$w_i = (0, 0, 0.26, 0.29, 0.29, 0.17, 0)$$

La tabla 6.5 muestra el resultado de las valoraciones globales de QoS obte-

| Alternativas | Valoraciones Globales |
|---|---|
| $v(x_1)$ | $(s_{14}, -.46)$ |
| $v(x_2)$ | $(s_{12}, .09)$ |
| $v(x_3)$ | $(s_{18}, -.14)$ |
| $v(x_4)$ | $(s_{20}, .11)$ |
| $v(x_5)$ | $(s_{8}, .11)$ |
| $v(x_6)$ | $(s_{15}, -.26)$ |
| $v(x_7)$ | $(s_{1}, -.23)$ |
| $v(x_8)$ | $(s_{8}, .17)$ |
| $v(x_9)$ | $(s_{9}, .31)$ |
| $v(x_{10})$ | $(s_{6}, -.34)$ |
| $v(x_{11})$ | $(s_{0}, 0)$ |
| $v(x_{12})$ | $(s_{2}, -.11)$ |
| $v(x_{13})$ | $(s_{11}, -.37)$ |
| $v(x_{14})$ | $(s_{17}, .43)$ |
| $v(x_{15})$ | $(s_{18}, .17)$ |
| $v(x_{16})$ | $(s_{21}, .49)$ |
| $v(x_{17})$ | $(s_{19}, 0)$ |
| $v(x_{18})$ | $(s_{13}, -.4)$ |
| $v(x_{19})$ | $(s_{17}, .09)$ |

Tabla 6.5: Valoraciones Globales para cada Alternativa.

nidas utilizando el operador OWA con cuantificador de mayoría. Para mayor detalle del proceso de obtención de pesos, $w_i$, ver ***Anexo B***.

A modo de ejemplo, para obtener el valor global de QoS $(s_{14}, -.46)$ (ver celda resaltada en la Tabla 6.5) utilizamos la siguiente expresión:

$$v(x_1) = AO^w((s_{24},0)(s_{21},0)(s_{18},0)(s_{12},0)(s_{12},0)(s_{12},0)(s_8,0)) = \Delta\left(\sum_{i=1}^{7} w_i\beta_i^*\right) =$$
$$= \Delta(0\cdot 24, 0\cdot 21, 0.26\cdot 18, 0.29\cdot 12, 0.29\cdot 12, 0.17\cdot 12, 0\cdot 8) =$$
$$= (s_{14}, -.46)$$

El proceso de cálculo es similar para los otros valores globales de QoS de la Tabla 6.5.

## 6.2. Asignación de Prioridades al Sistema de CT

Para este caso de estudio, en esta fase, hemos considerado 5 prioridades dentro del sistema de CT para brindar QoS a los usuarios de la red con el fin de cumplir los objetivos enunciados para la organización. Así, el vector de prioridades expresado como NDT es el siguiente:

$$P^o \in S^p = \{p_1^o, p_2^o, p_3^o, p_4^o, p_5^o\} \begin{cases} p_1^o = s_0^5 = MB = \ Muy\,Baja\,(0,0,.25) \\ p_2^o = s_1^5 = B = \ Baja\,(0,.25,.5) \\ p_3^o = s_2^5 = M = \ Media\,(.25,.5,.75) \\ p_4^o = s_3^5 = A = \ Alta\,(.5,.75,1) \\ p_5^o = s_4^5 = MA = \ Muy\,Alta\,(.75,1,1) \end{cases}$$

Como hemos mencionado, las valoraciones globales de QoS, $v(x_j)$, suelen ser transformadas a cualquier conjunto de términos lingüísticos original, $l(t^C, n(t^C))$, si se desea facilitar los cálculos en el algoritmo de asignación de prioridades y la lectura de los expertos que participaron del proceso de AD. En nuestro caso hemos utilizado un conjunto con 7 términos lingüísticos (ver Tabla 6.6):

$$l(t^C, n(t^C)) \, en \, ELH = \{s_0^7, .., s_6^7\}$$

| Alternativas | $TF_7^{t*}(v(x_j)) \rightarrow S^7 \in ELH$ |
|---|---|
| $v(x_1)$ | $(s_{14}, -.46) \rightarrow (s_3, .39)$ |
| $v(x_2)$ | $(s_{12}, .09) \rightarrow (s_3, .02)$ |
| $v(x_3)$ | $(s_{18}, -.14) \rightarrow (s_4, .46)$ |
| $v(x_4)$ | $(s_{20}, .11) \rightarrow (s_5, .03)$ |
| $v(x_5)$ | $(s_8, .11) \rightarrow (s_2, .03)$ |
| $v(x_6)$ | $(s_{15}, -.26) \rightarrow (s_4, -.31)$ |
| $v(x_7)$ | $(s_1, -.23) \rightarrow (s_0, .19)$ |
| $v(x_8)$ | $(s_8, .17) \rightarrow (s_2, .04)$ |
| $v(x_9)$ | $(s_9, .31) \rightarrow (s_2, .33)$ |
| $v(x_{10})$ | $(s_6, -.34) \rightarrow (s_1, .41)$ |
| $v(x_{11})$ | $(s_0, 0) \rightarrow (s_0, 0)$ |
| $v(x_{12})$ | $(s_2, -.11) \rightarrow (s_0, .47)$ |
| $v(x_{13})$ | $(s_{11}, -.37) \rightarrow (s_3, -.34)$ |
| $v(x_{14})$ | $(s_{17}, .43) \rightarrow (s_4, .36)$ |
| $v(x_{15})$ | $(s_{18}, .17) \rightarrow (s_5, -.46)$ |
| $v(x_{16})$ | $(s_{21}, .49) \rightarrow (s_5, .37)$ |
| $v(x_{17})$ | $(s_{19}, 0) \rightarrow (s_5, -.25)$ |
| $v(x_{18})$ | $(s_{13}, -.4) \rightarrow (s_3, .15)$ |
| $v(x_{19})$ | $(s_{17}, .09) \rightarrow (s_4, .27)$ |

Tabla 6.6: Transformación de las Valoraciones Globales a $S_2^7 \in ELH$.

Así, la Tabla 6.6 muestra los resultados en $S^7 \in ELH$ debido a que la mayoría de los expertos han expresado sus preferencias allí.

Con estos datos ahora podemos aplicar el algoritmo y medir las distancias.

| $v^C(x_j)$ | $p_1^o(0,0,.25)$ | $p_2^o(0,.25,.5)$ | $p_3^o(.25,.5,.75)$ | $p_4^o(.5,.75,1)$ | $p_5^o(.75,1,1)$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $v^C(x_1)$ | 0,5801 | 0,3214 | **0,0926** | 0,1940 | 0,3554 |
| $v^C(x_2)$ | 0,5196 | 0,2604 | **0,0651** | 0,2538 | 0,4170 |
| $v^C(x_3)$ | 0,7572 | 0,4999 | 0,2554 | **0,0650** | 0,1813 |
| $v^C(x_4)$ | 0,8423 | 0,5858 | 0,3397 | 0,1067 | **0,1066** |
| $v^C(x_5)$ | 0,3609 | **0,1067** | 0,1765 | 0,4179 | 0,5828 |
| $v^C(x_6)$ | 0,6295 | 0,3712 | **0,1336** | 0,1472 | 0,3058 |
| $v^C(x_7)$ | **0,1177** | 0,2119 | 0,4380 | 0,6801 | 0,8394 |
| $v^C(x_8)$ | 0,3625 | **0,1081** | 0,1749 | 0,4162 | 0,5811 |
| $v^C(x_9)$ | 0,4082 | 0,1502 | **0,1306** | 0,3679 | 0,5324 |
| $v^C(x_{10})$ | 0,2756 | **0,0658** | 0,2670 | 0,5119 | 0,6771 |
| $v^C(x_{11})$ | **0,0977** | 0,2378 | 0,4627 | 0,7039 | 0,8620 |
| $v^C(x_{12})$ | **0,1507** | 0,1738 | 0,4017 | 0,6453 | 0,8066 |
| $v^C(x_{13})$ | 0,4612 | 0,2020 | **0,0868** | 0,3131 | 0,4771 |
| $v^C(x_{14})$ | 0,7405 | 0,4832 | 0,2390 | **0,0676** | 0,1970 |
| $v^C(x_{15})$ | 0,7705 | 0,5134 | 0,2685 | **0,0660** | 0,1689 |
| $v^C(x_{16})$ | 0,8991 | 0,6430 | 0,3963 | 0,1563 | **0,0730** |
| $v^C(x_{17})$ | 0,8054 | 0,5486 | 0,3031 | **0,0804** | 0,1372 |
| $v^C(x_{18})$ | 0,5408 | 0,2817 | **0,0698** | 0,2326 | 0,3953 |
| $v^C(x_{19})$ | 0,7256 | 0,4681 | 0,2244 | **0,0733** | 0,2114 |

Tabla 6.7: Distancias entre Valoraciones Globales de QoS y Prioridades.

Los resultados pueden verse en la Tabla 6.7 y las celdas remarcadas indican la distancia más corta entre $v^C(x_j)$ y $p_t^o$.

| $p_1^o$ | $p_2^o$ | $p_3^o$ | $p_4^o$ | $p_5^o$ |
|---|---|---|---|---|
| $x_7$, $x_{11}$, $x_{12}$ | $x_5$, $x_8$, $x_{10}$ | $x_1$, $x_2$, $x_6$, $x_9$, $x_{13}$, $x_{18}$ | $x_3$, $x_{14}$, $x_{15}$, $x_{17}$, $x_{19}$ | $x_4$, $x_{16}$ |

Tabla 6.8: Resultados Finales de Asignaciones de Prioridades.

Los resultados finales de asignación de alternativas a prioridades según la distancia más corta pueden observarse en el vector de asignación representado por la Tabla 6.8.

**Construcción de la Estructura Jerárquica del Sistema de Control de Tráfico**

De acuerdo a los resultados obtenidos en el vector de asignación que se muestran en la Tabla 6.8, creamos la estructura jerárquica para soportar la distribución de prioridades sugeridas por la fase de análisis de decisión. En la figura 6.6 puede verse gráficamente esta asignación a cada una de las clases del proceso de CT.

La estructura jerárquica desde el punto de vista técnico es similar a la mostrada en el ***Anexo A*** considerando 5 clases para prioridades, pero en este caso los tipos de tráfico cambian, por lo que es necesario redefinir los filtros para asociarlos a las clases correspondientes.

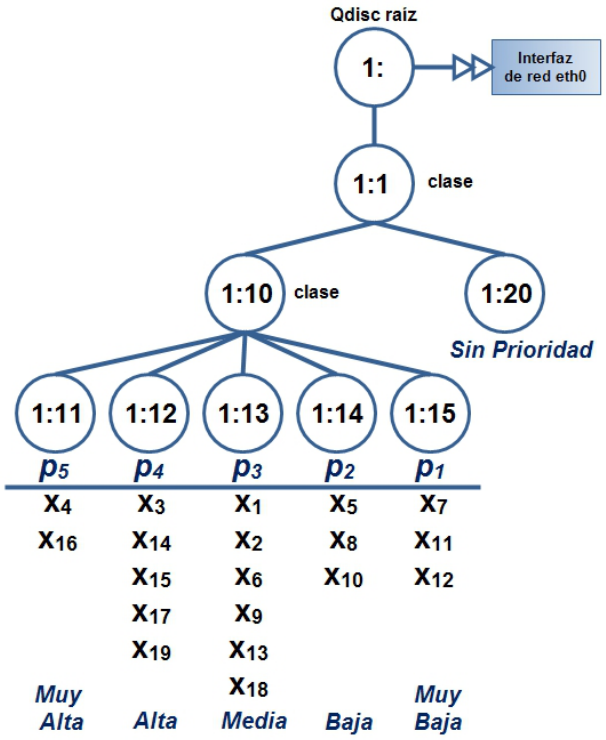



Figura 6.6: Estructura de Implementación.

A continuación mostramos el *script*, con números de línea, que se *ejecuta* para la configuración del sistema de CT para este caso de estudio:

En las líneas 1, 2 y 3 sólo definimos variables para simplificar escrituras posteriores. Luego, en las líneas 4 y 5 creamos la qdisc raíz y la clase inicial $\ll 1:1 \gg$ respectivamente (ver Figura 6.6).

```
1. # QDISC='tc qdisc add dev eth0'
2. # CLASS='tc class add dev eth0'
3. # FILTRO='tc filter add dev eth0 protocol ip'
4. # $QDISC root handle 1: htb default 20
5. # $CLASS parent 1: classid 1:1 htb rate 5Mbit ceil 5Mbit
```

Con las líneas 6 y 7 creamos las clases padres para la clasificación inicial del tráfico útil y el tráfico sin importancia en la APA.

```
6. # $CLASS parent 1:1 classid 1:10 htb rate 5Mbit ceil 5Mbit prio 1
7. # $CLASS parent 1:1 classid 1:20 htb rate 100kbit ceil 100kbit prio 6
8. #VELOCIDAD='htb rate 5000kbit ceil 5000kbit'
9. #ENCOLAMIENTO='esfq perturb 10 hash src'
10. #$CLASS parent 1:10 classid 1:11 $VELOCIDAD
11. #$CLASS parent 1:10 classid 1:12 $VELOCIDAD prio 1
12. #$CLASS parent 1:10 classid 1:13 $VELOCIDAD prio 2
13. #$CLASS parent 1:10 classid 1:14 $VELOCIDAD prio 3
14. #$CLASS parent 1:10 classid 1:15 $VELOCIDAD prio 4
15. #$QDISC parent 1:11 handle 11: esfq perturb 10 hash src
16. #$QDISC parent 1:12 handle 12: $ENCOLAMIENTO
17. #$QDISC parent 1:13 handle 13: $ENCOLAMIENTO
18. #$QDISC parent 1:14 handle 14: $ENCOLAMIENTO
19. #$QDISC parent 1:15 handle 15: $ENCOLAMIENTO
20. #$QDISC parent 1:20 handle 20: $ENCOLAMIENTO
```

Nuevamente definimos en las líneas 8 y 9 variables (VELOCIDAD y ENCOLAMIENTO) para utilizar en las próximas líneas. Con las próximas 10 líneas se crean las 5 clases terminales (líneas 10 a 14) y 5 las qdisc asociadas a cada clase terminal (líneas 15 a 19) para asignarles luego, un tipo de tráfico.

| $X_{UGA}$ |
|---|
| 21. #IPT='iptables -t mangle -A FORWARD -i eth1' |
| 22. ($x_{17}$) #$IPT -p tcp -m iprange –dst-range 10.4.48.21-10.4.48.30 -j MARK –set-mark 12 |
| 23. ($x_{18}$) #$IPT -p tcp -m iprange –dst-range 10.4.48.31-10.4.48.40 -j MARK –set-mark 13 |
| 24. ($x_{19}$) #$IPT -p tcp -m iprange –dst-range 10.4.48.41-10.4.48.60 -j MARK –set-mark 12 |
| $X_{ALA}$ |
| 25. ($x_{11}$) #$IPT -p tcp -s www.prensa.chaco.gov.ar -j MARK –set-mark 15 |
| 26. ($x_{13}$) #$IPT -p tcp -m layer7 -l7proto msnmessenger -j MARK –set-mark 13 |
| 27. ($x_{13}$) #$IPT -p tcp -m layer7 -l7proto gtalk -j MARK –set-mark 13 |
| $X_{TLA}$ |
| 28. ($x_7$) #$IPT -p tcp –sport 20 -j MARK –set-mark 15 |
| 29. ($x_7$) #$IPT -p tcp –sport 21 -j MARK –set-mark 15 |
| 30. ($x_8$) #$IPT -p tcp –sport 25 -j MARK –set-mark 14 |
| 31. ($x_9$) #$IPT -p tcp –sport 110 -j MARK –set-mark 13 |
| 32. ($x_{10}$) #$IPT -p tcp –sport 80 -j MARK –set-mark 14 |
| $X_{ILA}$ |
| 33. ($x_1$) #$IPT -s 10.2.0.15 -j MARK –set-mark 13 |
| 34. ($x_2$) #$IPT -s 10.2.0.20 -j MARK –set-mark 13 |
| 35. ($x_3$) #$IPT -s 10.2.0.44 -j MARK –set-mark 12 |
| 36. ($x_6$)#$IPT -s 10.2.0.8 -j MARK –set-mark 13 |
| 37. ($x_{15}$) #$IPT -s 190.57.224.131 -j MARK –set-mark 12 |
| $X_{CTL}$ |
| 38. ($x_4$) #$IPT -p tcp –sport 443 -s hb.redlink.com.ar -j MARK –set-mark 11 |
| 39. ($x_5$) #$IPT -p tcp –sport 80 -s 10.2.0.60 -j MARK –set-mark 14 |
| 40. ($x_{12}$) #$IPT -p tcp –sport 80 -s facebook.com -j MARK –set-mark 15 |
| 41. ($x_{12}$) #$IPT -p tcp –sport 80 -s twitter.com -j MARK –set-mark 15 |
| 42. ($x_{14}$) #$IPT -p tcp –sport 80 -s 190.57.229.130 -j MARK –set-mark 12 |
| 43. ($x_{16}$) #$IPT -p tcp –sport 80 -s 190.57.229.132 -j MARK –set-mark 11 |
| 44. ($x_{16}$) #$IPT -p tcp –sport 80 -s etisig.siup.gov.ar -j MARK –set-mark 11 |

| ASOCIACIÓN DE FILTROS |
|---|
| 45. #$FILTRO parent 1: prio 1 handle 11 fw classid 1:11 |
| 46. #$FILTRO parent 1: prio 2 handle 12 fw classid 1:12 |
| 47. #$FILTRO parent 1: prio 3 handle 13 fw classid 1:13 |
| 48. #$FILTRO parent 1: prio 4 handle 14 fw classid 1:14 |
| 49. #$FILTRO parent 1: prio 5 handle 15 fw classid 1:15 |
| 50. #$FILTRO ip parent 1: prio 6 flowid 1:20 |

De igual manera, en la línea 20, creamos la qdisc para el tráfico sin importancia de acuerdo a las necesidades de la organización correspondiente a la clase $\ll 1:20 \gg$ con menor prioridad. Es decir, el tráfico que no es clasificado por los filtros y asociado a alguna clase particular porque no pertenece al conjunto de alternativas, se lo deriva a esta clase con la menor prioridad y ancho de banda posibles.

Al finalizar la creación de la estructura jerárquica de comportamiento para el CT debemos marcar cada tipo de tráfico (líneas 22 a 44) y luego según la marca asignarlo a cada clase correspondiente (líneas 45 a 50). En este caso usamos los filtros *fw* explicados en la Sección 2.3.2. Esta asignación se realiza automáticamente teniendo en cuenta los resultados finales del proceso de decisión según la Tabla 6.8.

Una vez creada la configuración para nuestro caso de estudio se procede a *ejecutarla* en el *ruteador de borde* de la organización. A partir de ese momento el sistema comienza a trabajar diferenciando el tráfico y encolando paquetes según la prioridad deseada respecto al proceso de decisión del nivel superior.

## Capítulo 7

# Conclusiones Finales y Trabajos Futuros

En este capítulo resaltamos las conclusiones del trabajo de investigación realizado y los resultados obtenidos. Y a partir del trabajo realizado indicamos cuáles son la líneas de trabajo futuro sobre los temas presentados en esta memoria. Finalmente, presentamos una lista de las publicaciones de nuestra investigación relacionadas con este campo.

## Conclusiones

En los procesos de asignación de Calidad de Servicio en networking en una organización se debe considerar que las aplicaciones de red utilizadas tengan un rendimiento adecuado según las necesidades propias de la organización. Para lograr un rendimiento óptimo se pueden implementar mecanismos y herramientas de QoS que realicen el control y coordinación de los recursos de conexión y de comunicación con redes externas e internet. Es decir, se debe considerar que haya una alta disponibilidad y eficiencia operacional de las aplicaciones y usuarios que hacen uso de los recursos de red en cuanto a

su nivel de importancia. Estos procesos pueden desarrollarse con herramientas de control del tráfico implementadas por los administradores de red en las organizaciones intentando lograr un uso más eficiente de los recursos de networking disponibles. Sin embargo, en determinadas situaciones, la visión sesgada de los administradores de red hace que puedan participar del proceso otros usuarios que tienen un conocimiento general de la organización independientemente de su conocimiento de networking y que a su vez participen en incrementar el nivel de productividad de la organización y de los usuarios de la red. Así, los administradores en su tarea pueden nutrirse de los aportes tanto técnicos como estratégicos de la organización a través de diferentes expertos con diferentes grados de conocimiento. Ellos pueden participar mejorando el proceso de decisión respecto a la asignación de prioridades para aplicaciones y usuarios de networking que son útiles en la organización.

De acuerdo a estas premisas, en este trabajo de investigación presentamos un nuevo tema de estudio basado en procesos de análisis de decisión donde un conjunto de expertos valoran a través de preferencias lingüísticas sus necesidades de QoS. Además, el hecho de que participen varios expertos y que puedan tener diferentes grados de conocimiento o experiencia hace que se necesiten diferentes escalas lingüísticas para expresar sus preferencias proporcionando un modelo flexible. La necesidad de múltiples escalas lingüísticas también está determinada por las propias características del problema y la subjetividad a la hora de expresar las preferencias sobre los tipos de tráfico de networking.

Por otro lado, hemos realizado un estudio de las diferentes tecnologías y estándares que han sido propuestas sobre QoS en networking, prestando especial atención a la evolución y tendencias de los procesos de QoS como una

herramienta inteligente e integrada a sistemas de seguridad en este campo de estudio. Esto nos permitió centramos en una propuesta con dos aspectos. Por un lado, los procesos de Control de Tráfico para hacer las implementaciones y pruebas técnicas en nuestro caso de estudio real y, por otro lado, en un modelo de decisión superior para lograr abstraer a los decisores de la complejidad en el uso de las herramientas de control de tráfico. Por lo que hemos propuesto el modelo de decisión de alto nivel capaz de adaptarse a las tecnologías existentes y orientado a las nuevas tendencias de QoS.

Así, a lo largo de esta memoria, el objetivo principal a alcanzar ha sido el diseño flexible de modelos de análisis de decisión a través de dominios lingüísticos proporcionados por diferentes fuentes con múltiples escalas. Para lograr esto, hemos tenido que profundizar en el área del modelado de problemas de toma de decisión, el manejo de la incertidumbre y las tecnologías de QoS, lo que permitió diseñar un modelo de decisión basado en Jerarquías Lingüísticas Extendidas que se acople directamente a un mecanismo de QoS.

Finalmente, hemos construido un modelo de decisión basado en diferentes fases y hemos propuesto un algoritmo que realiza la función de abstracción entre el proceso de decisión y las herramientas de QoS. Esto se ha logrado implementando y refinando el modelo con un caso de estudio real donde se han alcanzado excelentes resultados y participación de diferentes expertos que enriquecieron el proceso con su conocimiento tanto técnico como estratégico de la organización. Actualmente se encuentran funcionando los resultados del modelo con una estructura de control de tráfico en dicha organización proporcionando diferentes ventajas como asignación de mejores prioridades al tráfico que es sensible al retardo de modo tal que las aplicaciones no críticas para la operación de la organización no entorpezcan el tráfico que correspon-

de a aplicaciones críticas para ella. En líneas generales, la implementación de este modelo ha tenido muy buena aceptación de los usuarios de la red y hemos logrado que participen del proceso de decisión diferentes expertos que ayudaron a lograr un mejor rendimiento laboral.

Como podemos observar, todos los objetivos enunciados al inicio de nuestra investigación han sido alcanzados a través de las propuestas presentadas y los aportes logrados con nuestra investigación.

## Trabajos Futuros

Los procesos de QoS que hemos utilizado en esta memoria de investigación son de gran importancia y utilidad a nivel organizacional para incrementar su productividad. En este sentido, se está trabajando en desarrollar, estudiar y comparar resultados con modelos de decisión basados en términos lingüísticos no balanceados, teniendo también en cuenta múltiples criterios, múltiples atributos de control de tráfico y escenarios académicos universitarios en los que puede resultar útil nuestra propuesta.

Por otra parte, el hecho de tratarse de numerosos servicios de red que pueden ser analizados, sumado a los usuarios particulares que también pueden formar parte de las alternativas, puede dar lugar a extender el trabajo considerando procesos previos de consenso para grandes organizaciones. De igual manera los expertos que participan del proceso pueden ser ordenados por grupos de experticia o conocimiento lo que generará una etapa de agregación extra ponderando tales atributos.

Por último, es importante destacar que inicialmente los procesos de recopilación de información y cálculos se han realizado de forma manual para el

caso de estudio real. Sin embargo, actualmente se está desarrollado un prototipo software que implementa el modelo de decisión a alto nivel, siendo una herramienta de gran ayuda para los participantes en el proceso de decisión. Además, aprovechando la tecnología actual, este trabajo también puede ser implementado integrando tecnologías multiplataforma que permitiría desarrollar la aplicación de software que facilite su uso de manera interactiva y distribuida. Es decir, además de trabajar con tecnologías web (en desarrollo actualmente) es necesario generalizar el software para trabajar con tecnologías móviles (smartphones con Android) que faciliten el proceso de decisión a los expertos.

# Publicaciones

Para finalizar, en relación a la difusión y publicación de los resultados presentados en esta memoria, destacamos las siguientes publicaciones:

**En revistas Internacionales.**

Sergio Gramajo, Luis Martínez, "A linguistic decision support model for QoS priorities in networking", Knowledge-Based Systems, 32(0): 65 - 75, 2012. New Trends on Intelligent Decision Support Systems.

**En Congresos Internacionales**

Gramajo, S., Martínez, L. "A multi-granluar linguistic QoS model for networking". Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, ISKE 2010. November $15th-16th$, 2010. On page(s): 652 - 657. Hangzhou, China. ISBN: $978-1-4244-6791-4$. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ISKE.2010.5680770
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5680770

Gramajo, S., Martínez, L. “Decision Analysis Linguistic Model of Network Services”. Proceedings of 2010 World Congress & Exhibition Engineering - Chapter Information and Communication Technologies (ICTs). October $17th - 20th$, 2010. Buenos Aires, Argentina. ISBN: $978 - 987 - 595 - 145 - 7$ (Printed in Argentina by Talleres Gráficos Servicop, in August, 2011)

**Premio Best Paper Award**

Congreso Mundial de Ingeniería 2010. Capítulo. Information and Communication Technologies (ICTs). Paper: Sergio Gramajo, Luis Martínez. “Decision Analysis Linguistic Model of Network Services”.
URL: http://www.ingenieria2010.com.ar/es/boletines/ultimo-numero/416-los-trabajos-ganadores-.html
Actas: http://www.ingenieria2010.com.ar/es/prensa/noticias/430-compendio-ingenieria-2010-argentina.html

**En Congresos Nacionales**

Gramajo, S. Martínez, L. “Modelo Lingüístico de QoS para Servicios de Red”. Congreso Español de Informática (CEDI2010). Actas del III Simposio sobre Lógica Difusa y Soft Computing LFSC2010 (EUSFLAT). Septiembre de 2010. pp 59 - 66. Valencia, España. ISBN: $978 - 84 - 92812 - 65 - 3$ (Ibergaceta Publicaciones, Madrid)

Gramajo, S., Karanik, M., Pinto, N., Cabrera, D., Alurralde, M. “Modelo de Apoyo para la Toma de Decisiones en QoS”. XVII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación (CACIC 2011). XII Workshop Agentes y Sistemas Inteligentes (WASI). Universidad Nacional de la Plata. Noviembre de 2011. Buenos Aires, Argentina. ISBN: $978 - 950 - 34 - 0756 - 1$.

# ANEXOS

## Anexo A

# Ejemplo de Construcción de un Sistema de CT en SWL

Este anexo describe un ejemplo de la implementación de un sistema de control de tráfico para networking basado en SWL en una organización. Inicialmente describimos el estado de la organización y sus necesidades particulares para optimizar el tráfico de la red. Posteriormente, proponemos la solución siguiendo las etapas de construcción de un sistema de CT que hemos visto en la Sección 2.3.3.

Supongamos una organización llamada "*Org*" que cuenta con una red de área local (LAN) como se muestra en la Figura A.1, la cual está formada por numerosos dispositivos como computadoras personales, smartphones, laptops, etc. a los que llamaremos "*Devs*" como forma de generalización. Los *Devs* utilizan una conexión a internet y sistemas externos a través de un ruteador con el SO Linux (RSOL). *Org* tiene además diferentes sistemas informáticos y bases de datos que están fuera de su red LAN y a los cuáles los usuarios de *Org* deben acceder a diario para realizar su trabajo, además del uso de los servicios de internet.

Debido a la cantidad actual y al número creciente de *Devs* que hacen uso del *enlace externo* es muy común que exista saturación de recursos y que los sistemas y usuarios críticos se vean afectados en su rendimiento por sistemas y usuarios menos prioritarios. La afectación del rendimiento implica que también se comprometa la productividad de *Org* por lo que es necesario implementar un sistema de control de tráfico para mejorar la calidad del servicio.

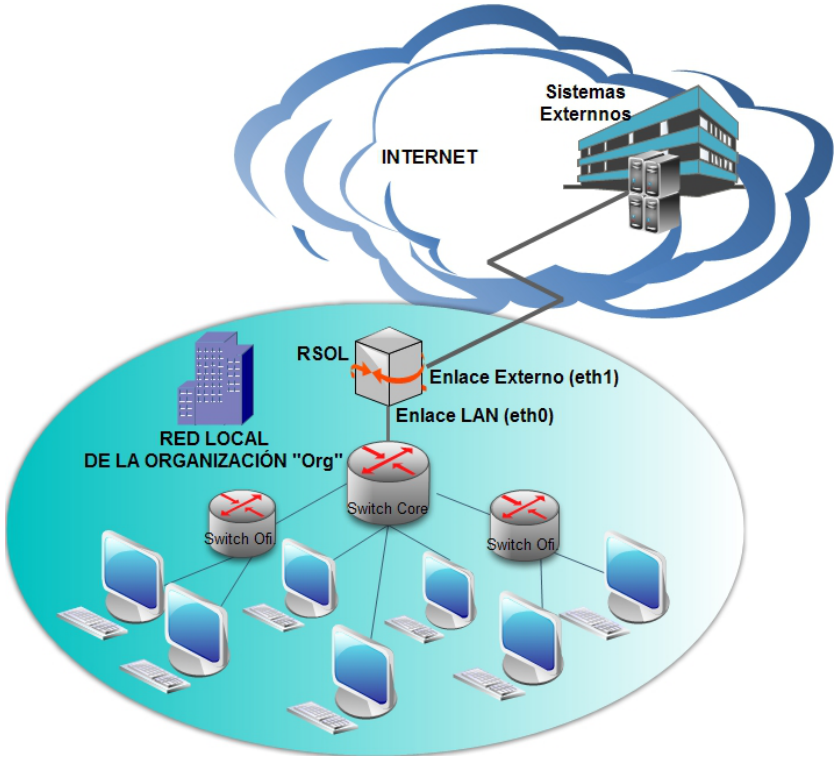



Figura A.1: Escenario de Ejemplo para aplicación con SWL.

A continuación vamos a describir cada una de las etapas del proceso de construcción del sistema de CT en el ejemplo propuesto.

**Etapa 1. Preliminares.**

Suponemos que los aspectos técnicos de instalación y puesta a punto del

sistema ya han sido realizados.

**Etapa 2. Análisis de Servicios.**

Siguiendo con el ejemplo, vamos a suponer que *Org* tiene los siguientes tipos de tráfico que son útiles para su funcionamiento y que necesitan ser diferenciados:

- T1) Tráfico web destinado al uso común de internet.
- T2) Tráfico de correo electrónico.
- T3) Tráfico del sistema remoto *clientes y ventas*.
- T4) Tráfico del sistema remoto *base de datos histórica*.
- T5) Tráfico P2P.
- T6) Cualquier tipo de tráfico del grupo de usuarios *dirección general*.

Para este ejemplo, por razones de simplicidad, vamos a suponer que el ancho de banda disponible de internet es de 1 Mbps y a partir de un análisis se van a tener en cuenta 6 tipos de prioridad.

**Etapa 3. Diseño del Sistema de CT.**

De acuerdo al ejemplo, hemos decidido que cada uno de los tipos de tráfico identificados en la etapa previa y las correspondientes prioridades son las mostradas en la Tabla A.1. A partir de ellas construimos la estructura jerárquica en forma de árbol que modele el comportamiento del todo el tráfico de red para la organización *Org* (ver Figura A.2). Para ello, seleccionamos el tipo de encolamiento que modele el comportamiento general del tráfico de red de *Org*.

| Tipo de Tráfico | Características | Prioridad esperada |
|---|---|---|
| T1 | Tráfico web destinado al uso común de internet que generalmente se origina con los navegadores de internet. Se identifican con el puerto 80 TCP | Prio 5 |
| T2 | Tráfico de correo electrónico. Se identifican con el puerto 25 y 110 TCP | Prio 4 |
| T3 | Tráfico del sistema remoto *clientes y ventas*. *Org* tiene acceso a un sistema remoto centralizado de gestión de clientes, ventas, productos, facturación, etc. que se encuentra en otro lugar físico y se accede a través de Internet. | Prio 1 |
| T4 | Tráfico del sistema remoto *base de datos histórica*. Al igual que T3, T4 tiene el mismo concepto, pero en este caso se puede tener acceso a base de datos para generación estadística y de perspectiva corporativa, simulación, etc. | Prio 2 |
| T5 | Tráfico P2P. Generalmente este tipo de tráfico puede ocupar *puertos bien conocidos* y crear varias conexiones simultáneas. Es por este motivo que muchas veces es necesario hacer un análisis más profundo en los paquetes para identificarlos y asignarles la prioridad necesaria. | Prio 6 |
| T6 | Cualquier tipo de tráfico del grupo de usuarios *dirección general*. Podemos identificar este tipo de tráfico a través de la dirección IP de los usuarios. | Prio 3 |

Tabla A.1: Ejemplo de Prioridades para Tipos de Tráfico.

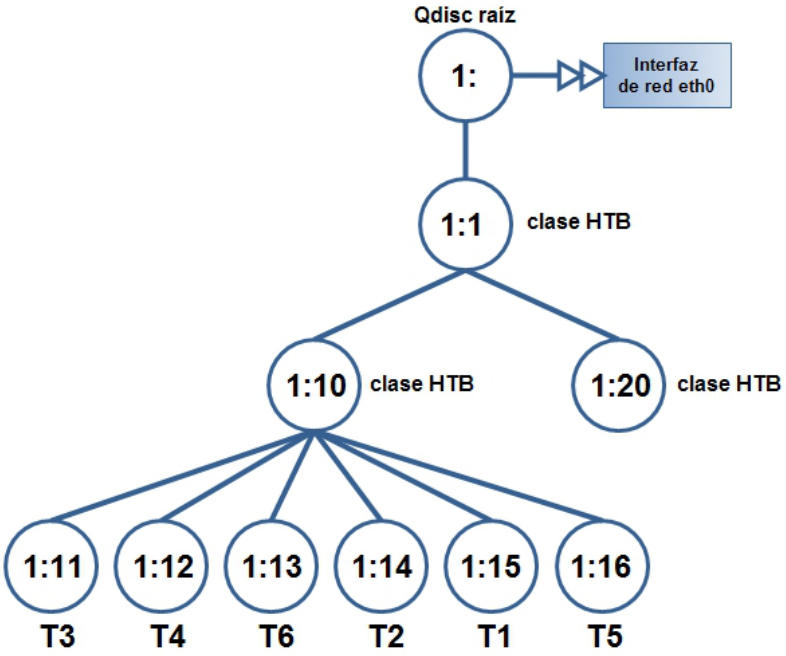



Figura A.2: Estructura Jerárquica del Ejemplo de Aplicación 1.

**Etapa 4. Implementación de la Estructura Jerárquica de CT.**

Para continuar con el ejemplo vamos a mostrar los comandos utilizados para crear la estructura necesaria. Note que dichos comandos aparecerán en un recuadro gris enumerado.

```
1. # QDISC='tc qdisc add dev eth0'
2. # CLASS='tc class add dev eth0'
3. # $QDISC root handle 1: htb default 20
4. # $CLASS parent 1: classid 1:1 htb rate 1Mbit ceil 1Mbit
```

Las líneas 1 y 2 solamente definen variables para agregar *qdisc* y clases respectivamente con el fin de simplificar los comandos a utilizar ya que usan una parte común a todos. En la línea 3, con *root* indicamos que queremos crear la *qdisc raíz* que tendrá el identificador $\ll 1:\gg$. A partir de allí creamos la

estructura de clases y disciplinas de colas que dependen de ella. En la línea 4 definimos la clase $\ll 1:1 \gg$ que depende de root (*parent 1:*) con un comportamiento definido por el algoritmo de encolamiento HTB. Esta clase no dejará exceder la velocidad de 1Mbit ya que *ceil* hace referencia al máximo posible de transferencia y *rate* al mínimo garantizado.

Para continuar con el tercer nivel de la jerarquía, como se observa en los procesos *c* y *d* de la Figura 2.9, ahora vamos a crear las subclases que modelarán el comportamiento del tráfico identificado (ver líneas 5 y 6):

- Clase $\ll 1:10 \gg$ En esta clase contiene las subclases que definen el comportamiento y las prioridades según la tabla A.1.
- Clase $\ll 1:20 \gg$ En esta clase se define el comportamiento del tipo de tráfico que no está especificado en el uso diario.

La razón de que no hayamos creado estas clases directamente dependientes de la raíz $\ll 1: \gg$, es que la *qdisc raíz* no puede prestar ancho de banda si sobra, y por ello necesitamos crear la banda intermedia $\ll 1:1 \gg$ aunque esto depende de cada escenario de aplicación.

```
5. # $CLASS parent 1:1 classid 1:10 htb rate 1Mbit ceil 1Mbit prio 1
6. # $CLASS parent 1:1 classid 1:20 htb rate 100kbit ceil 100kbit prio 7
```

Para asignar prioridad a los tipos de tráfico se puede hacer mediante el indicador *prio*. Cuanto menor es el índice *prio* mayor es la prioridad, y por defecto *prio* siempre es 0, con lo cual si no especificamos nada, crearemos clases con la prioridad más alta.

Ahora debemos crear las seis subclases para las prioridades de los tipos de tráfico identificados para *Org* de acuerdo a la Tabla A.1. De la misma manera

que en la línea 1, en la línea 7 definimos una variable que utilizaremos luego. Y desde las líneas 8 a 13 definimos las clases terminales que tienen su prioridad asignada en el sistema de CT.

```
7. # VELOCIDAD='htb rate 500kbit ceil 900kbit'
8. # $CLASS parent 1:10 classid 1:11 $VELOCIDAD prio 0
9. # $CLASS parent 1:10 classid 1:12 $VELOCIDAD prio 1
10. # $CLASS parent 1:10 classid 1:13 $VELOCIDAD prio 2
11. # $CLASS parent 1:10 classid 1:14 $VELOCIDAD prio 3
12. # $CLASS parent 1:10 classid 1:15 $VELOCIDAD prio 4
13. # $CLASS parent 1:10 classid 1:16 $VELOCIDAD prio 5
```

El algunos casos puede resultar necesario añadir una qdisc ESFQ bajo cada una de las clases para que los dispositivos de red tengan la misma oportunidad de salir a la red. Sin embargo, en nuestro caso nos basamos en la prioridades de cada una de las clases creadas.

**Comentario 8** *La situación originada por la elección de una qdisc adecuada depende de cada administrador de red y de las necesidades específicas de la organización para cumplir con los objetivos de control de tráfico. Sin embargo, para alcanzar los objetivos de esta memoria de investigación aquí proponemos estructuras jerárquicas de CT que han dado buenos resultados finales y que se pueden acoplar perfectamente a la arquitectura final de nuestro modelo.*

```
14. # ENCOLAMIENTO='esfq perturb 10 hash src'
15. # $QDISC parent 1:11 handle 11: $ENCOLAMIENTO
16. # $QDISC parent 1:12 handle 12: $ENCOLAMIENTO
17. # $QDISC parent 1:13 handle 13: $ENCOLAMIENTO
18. # $QDISC parent 1:14 handle 14: $ENCOLAMIENTO
19. # $QDISC parent 1:15 handle 15: $ENCOLAMIENTO
20. # $QDISC parent 1:16 handle 16: $ENCOLAMIENTO
```

En la línea 14, la variable *$ENCOLAMIENTO* determina el tipo de cola a utilizar que se asocia a la clase padre debido a que son clases terminales. A través de *Perturb 10* se reconfigura el *hash* cada 10 segundos, y *hash src* es el modificador para que el reparto se haga en base a la dirección IP de la conexión. Para mayor detalle de estos comandos y sus parámetros ver [63][88].

De igual manera creamos la disciplina de cola para el tráfico no clasificado y lo asociamos a la clase $\ll 1:20 \gg$ (ver línea 21).

```
21. # $QDISC parent 1:20 handle 20: $ENCOLAMIENTO
```

Con este comando terminamos el proceso iterativo (procesos *c* y *d* de la Figura 2.9) que crea la estructura jerárquica de CT para este ejemplo

**Etapa 5. Asignar Tipos de Tráfico a la Estructura de CT.**

Con el objeto de mostrar su funcionamiento, para este ejemplo vamos a utilizar dos tipos de filtros, los filtros **fw** y los filtros **u32** (ver Sección 2.3.2).

Los filtros *fw* trabajan a través de un firewall del SO Linux llamado *iptables*[63][146] que es capaz de hacer unas *marcas* a los paquetes con el fin de que posteriormente se envíe el tráfico a las clases adecuadas (ver procesos *b* y *c* de la Figura 2.9).

**Comentario 9** *Es importante notar que en el firewall se necesita utilizar NAT (Network Address Traslation) para hacer el reenvío de los paquetes por lo que habrá que marcar los paquetes en la regla* FORWARD *de* iptables. Para obtener mayor detalle sobre el funcionamiento del firewall véase [63][88] [146].

Siguiendo con los procesos *b* y *c* de la etapa 5, primero vamos a marcar los paquetes del tipo T6 con iptables como se observa en la línea 23 y 24.

En la línea 22, la variable $CONDICION1 indica que se realiza una inserción en la cadena de reenvío (FORWARD) cuando un paquete coincide con que provenga de la interfaz de red correspondiente a redes externas *eth1* (*-i eth1 -s 0.0.0.0*) y además el destino sea la subred correspondiente al grupo de usuarios directivos (*-d 10.4.48.0/24*). Con (*-j MARK*) y (*-set-mark [id]*) le ponemos el número de marca al paquete. Se usa *RETURN* para evitar la coincidencia múltiple de paquetes.

```
22. # CONDICION1='iptables -t mangle -A FORWARD -i eth1 -s 0.0.0.0
-d 10.4.48.0/24'
23. # $CONDICION1 -j MARK –set-mark 13
24. # $CONDICION1 -j RETURN
```

Para realizar un procedimiento similar pero en este caso para un paquete P2P (tipo de tráfico T5) podemos utilizar un módulo para el firewall llamado *L7-filter* cuya función es incrementar la funcionalidad de iptables utilizando análisis de la cabecera de los paquetes a través de expresiones regulares [63]. Esto da una potencia extra al proceso de marcado de paquetes ya que además se pueden identificar tipos de tráfico de alto nivel como es el caso de los servicios de mensajería, virus, juegos, extensión de archivos y otros protocolos específicos.

```
25. # IPT='iptables -t mangle -A FORWARD -i eth1 -p tcp -m layer7'
26. # $IPT --l7proto edonkey -j MARK –set-mark 16
27. # $IPT --l7proto ares -j MARK –set-mark 16
28. # $IPT --l7proto bittorrent -j MARK –set-mark 16
29. # $IPT --l7proto fasttrack -j MARK –set-mark 16
```

Note que en las reglas anteriores hemos marcado los paquetes con el número 16 pero se han tenido que crear distintas reglas para cada uno de los protocolos P2P (*edonkey, ares, bittorrent, fasttrack*) que consideramos necesarios para nuestro caso (ver líneas 26 a 29).

Hasta este punto, lo que hemos hecho es marcar dos tipos de tráfico que son necesarios (T5 y T6), aunque para que cada uno de ellos ingrese al sistema de control de tráfico es necesario asociar estas marcas con las clases creadas (proceso *c* de la Figura 2.9). Para ello configuramos los filtros dentro de la *qdisc raíz* para que envíe los paquetes a las clases correspondientes.

```
30. # FILTRO='tc filter add dev eth0 protocol ip'
31. # $FILTRO parent 1: prio 3 handle 13 fw classid 1:13
32. # $FILTRO parent 1: prio 6 handle 16 fw classid 1:16
```

En las líneas 31 y 32 se usa el modificador *fw classid [id]* para que se clasifique el tráfico en base a la marca del paquete hecha con iptables que coincide con *handle [id]*.

Una alternativa para el uso de marcas en los paquetes es utilizar los filtros *u32*. Este tipo de filtros nos permite hacer clasificaciones en base a la cabecera IP. Este proceso puede ser más complejo que el anterior aunque es un método directo para asignar el tipo de tráfico a la clase. Una desventaja respecto al método anterior es que las posibilidades de identificar el tráfico son inferiores debido a que sólo evalúan el contenido de la cabecera IP por lo que filtros como P2P no pueden hacerse con este método.

Sólo queda por identificar el tráfico T1, T2, T3 y T4 y asignarlos a las clases $\ll 1:15 \gg$, $\ll 1:14 \gg$, $\ll 1:11 \gg$ y $\ll 1:12 \gg$ respectivamente de acuerdo comandos mostrados en las líneas 33 a 39 (ver Figura A.2):

-Para T1, en la línea 33, el comando identifica el tráfico asociado al dispositivo eth0 con la raíz $\ll 1 :\gg$ para transferencia web (*match ip dport 80 0xffff*) destinado al uso común de internet y lo asocia a $\ll 1 : 15 \gg$ con prioridad 5 (*prio 5*).

-Para T2, en las líneas 34 y 35, los comandos identifican el tráfico de correo electrónico asociado al dispositivo eth0 con la raíz $\ll 1 :\gg$ para envío de mails (*match ip dport 25 0xffff*) y recepción de mails (*match ip dport 110 0xffff*) y lo asocian a $\ll 1 : 14 \gg$ con prioridad 4 (*prio 4*).

-Para T3, en las líneas 36 y 37, los comandos identifican el tráfico para transferencia con el sistema remoto de *clientes y ventas* (*match ip dst/src 1.2.3.4/32*) y lo asocian a $\ll 1 : 11 \gg$ con prioridad 1 (*prio 1*).

-Para T4, en las líneas 38 y 39, los comandos identifican el tráfico para transferencia con *base de datos histórica* (*match ip dst/src 4.3.2.0/24*), y lo asocian a $\ll 1 : 12 \gg$ con prioridad 2 (*prio 2*).

```
33. # $FILTRO parent 1: prio 5 u32 match ip sport 80 0xffff flowid 1:15
34. # $FILTRO parent 1: prio 4 u32 match ip dport 25 0xffff flowid 1:14
35. # $FILTRO parent 1: prio 4 u32 match ip sport 110 0xffff flowid 1:14
36. # $FILTRO parent 1: prio 1 u32 match ip src 1.2.3.4/32 flowid 1:11
37. # $FILTRO parent 1: prio 1 u32 match ip dst 1.2.3.4/32 flowid 1:11
38. # $FILTRO parent 1: prio 2 u32 match ip src 4.3.2.0/24 flowid 1:12
39. # $FILTRO parent 1: prio 2 u32 match ip dst 4.3.2.0/24 flowid 1:12
```

Note que la identificación de T6 puede hacerse con el filtro *u32*. Sin embargo, esto no sucede con T5 que sólo podría realizarse con un filtro tipo *fw* (utilizando iptables en nuestro caso). Para terminar de definir el comportamiento de la estructura completa de QoS basada en CT, debemos indicar al sistema qué hacer si un paquete no coincide con los filtros y las clases definidas. Para nuestro ejemplo lo debemos enviar a la clase $\ll 1 : 20 \gg$ con la prioridad más baja como se observa en el comando de la línea 40.

```
40. # $FILTRO parent 1: prio 7 flowid 1:20
```

A modo de resumen aclaratorio, imaginemos qué ocurre si desde la LAN de *Org* intentamos conectarnos al sistema P2P Ares. El funcionamiento del sistema de CT para este caso es el siguiente:

1. El programa intenta acceder a Internet a través de la puerta de enlace o ruteador donde hemos instalado QoS.

2. A los paquetes que coinciden con la regla de iptables de Ares se les coloca la marca 6.

3. Luego, estos paquetes llegan a la *qdisc raíz*.

4. Desde dentro de la *qdisc*, se llama a los filtros. Se identifica la marca del paquete y lo envía a la clase correspondiente $\ll 1:16 \gg$

5. El paquete sale por eth0, con las limitaciones que hemos impuesto en $\ll 1:16 \gg$, prioridad 6 (si hay por ejemplo paquetes de tráfico del sistema remoto de *clientes y ventas* entonces saldrán antes porque su prioridad es mayor).

**Comentario 10** *La complejidad se mantiene para identificar qué tráfico deseamos mantener controlado, es decir, si el tráfico es de "subida" o el tráfico es de "bajada". Este es un aspecto importante para el administrador de red ya que van a cambiar las condiciones de los filtros utilizados. Para mayor detalle véase [63][88][146].*

Consideremos el mismo escenario del ejemplo anterior pero ahora haremos la implementación de las necesidades de *Org* mediante la qdisc PRIO. Como

hemos mencionado anteriormente, la qdisc PRIO no realiza ajustes, cada paquete que recibe lo reenvía a una clase hija de acuerdo con la configuración de sus filtros.

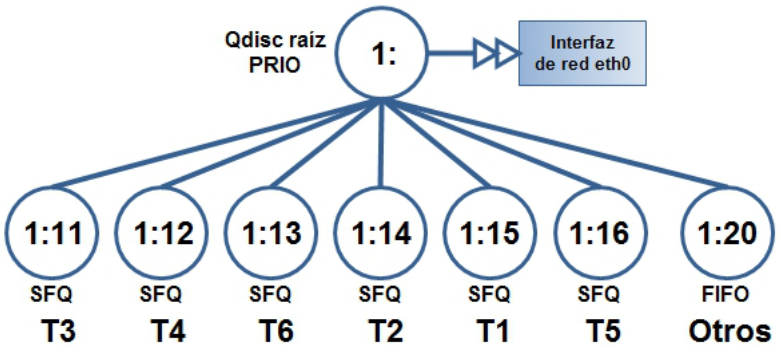



Figura A.3: Estructura Jerárquica del Ejemplo de Aplicación 2.

Para implementar la estructura de QoS es necesario construir una estructura de clases similar a la que se observa en la Figura A.3. Lo primero que vamos a hacer es crear la disciplina de colas asociada teniendo en cuenta que cuando se crea una qdisc PRIO (ver procesos a, b y c de la etapa 4 en la Figura 2.9) tiene varias clases internas la $\ll x:1 \gg$, $\ll x:2 \gg$, .... Las clases se crean automáticamente cuando se crea una qdisc prio y si no especificamos nada se crean tres bandas FIFO con prioridad 0, 1 y 2 aunque cambiando el parámetro *bands* podemos incrementar el número de bandas y asociar otro tipo de qdisc a las clases.

De acuerdo al ejemplo anterior de *Org* se consideran 7 bandas (ver Figura A.3) donde las 6 primeras corresponden a los tipos de tráfico T1 a T6 con qdisc SFQ y la última es la clase que define la prioridad más baja para el tráfico no clasificado con qdisc FIFO.

Desde la línea 42 a la 47 se realiza el proceso *d* de la Figura 2.9 ya que

las clases se crean automáticamente con el primer comando (ver línea 41).

```
41. # $QDISC root handle 1: prio bands 7
# Esto crea instantáneamente las clases 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 1:6 y 1:7
42. # $QDISC parent 1:1 handle 10: sfq
43. # $QDISC parent 1:2 handle 20: sfq
44. # $QDISC parent 1:3 handle 30: sfq
45. # $QDISC parent 1:4 handle 40: sfq
46. # $QDISC parent 1:5 handle 50: sfq
47. # $QDISC parent 1:6 handle 60: sfq
```

Los filtros que realizan la identificación del tráfico y la asignación a las clases correspondientes se realizan de manera similar a la estructura vista anteriormente en la etapa 5.

Note que hemos propuesto dos modos de construir un sistema de CT. El primero usando disciplinas de colas HTB y el segundo usando PRIO.

El segundo modo es más simple de llevar a la práctica desde el punto de vista de complejidad. Sin embargo, este modo no realiza ajustes de tráfico ni permite ciertos parámetros como los que usa una qdisc HTB.

Por estas razones, para el caso de estudio que hemos realizado en el Capítulo 6 utilizamos una estructura jerárquica de comportamiento basada en disciplinas de colas HTB.

## Anexo B

# Cuantificadores Lingüísticos Difusos

En este anexo hacemos una revisión de cuantificadores lingüísticos debido a la relevancia que tiene el proceso de obtención de pesos en los operadores de agregación que son sugeridos en la Sección 5.2.3 para este tipo de problemas.

En la lógica clásica o lógica booleana, los cuantificadores se usan para representar la cantidad de elementos que satisfacen un predicado. En este sentido la lógica booleana tiene únicamente dos cuantificadores: el *existencial* (*existe*, $\exists$) y el *universal* (*para todo*, $\forall$). Sin embargo, en el lenguaje natural podemos describir cantidades que están entre el existencial y el universal las cuales no pueden manejarse por los métodos formales de la lógica clásica.

Por lo tanto, algunas veces resulta útil expresar cantidades imprecisas de elementos que satisfacen una condición lógica. Esto justifica la existencia de cuantificadores lingüísticos como por ejemplo *bastante*, *casi todos*, *la minoría*, *la mayor parte de*, *aproximadamente la mitad de*, etc. Los cuantificadores lingüísticos son usados para medir (cuantificar) la cantidad o la

proporción de objetos o elementos que cumplen o satisfacen cierta condición, lo que permite flexibilizar la expresión de cantidades en sentencias lógicas. Estos cuantificadores, así definidos, son llamados frecuentemente cuantificadores lingüísticos difusos e interpretados por medio de conjuntos difusos. Este concepto fue introducido por L. Zadeh [186]. Las sentencias cuantificadas difusas han sido objeto de estudio de diversas investigaciones, dando lugar a varias interpretaciones [54][167][168][170][173], usos en procesos de toma de decisión en grupo [29][79][95] e introducción del concepto de mayoría difusa [93][131].

La interpretación de los cuantificadores lingüísticos es dependiente del usuario y está acotada por su semántica intuitiva en el lenguaje natural. Esto permite hacer la siguiente clasificación de los cuantificadores lingüísticos difusos según su interpretación:

- **Según su naturaleza:**

  **1. Cuantificadores absolutos.** Los cuantificadores absolutos representan cantidades que son absolutas por naturaleza, como por ejemplo *aproximadamente 9*, *aproximadamente más de 3*, etc.

  Éstos se interpretan por medio de subconjuntos difusos de números reales no negativos, $\Re^+$. Así, se representan mediante un subconjunto difuso, $Q$, tal que $\forall\ \alpha \in \Re^+$ el grado de pertenencia de $\alpha$ en $Q$, $Q(\alpha)$ indica el grado de compatibilidad entre la cantidad $\alpha$ y el significado representado por el cuantificador, $Q$.

  **2. Cuantificadores proporcionales o relativos.** Los cuantificadores relativos representan proporciones de elementos respecto del conjunto completo, como por ejemplo *al menos la mitad*, *la mayoría*, etc.

  Éstos son representados por subconjuntos difusos en el intervalo $[0, 1]$,

de modo que $\forall\ \alpha \in [0,1]$, $Q(\alpha)$ indica el grado con el cual dicha proporción, $\alpha$, es compatible con el significado del cuantificador $Q$.

- **Según su comportamiento:**

  **1. Cuantificadores crecientes.** Los cuantificadores crecientes son aquellos que se interpretan por medio de un conjunto difuso con una función de pertenencia creciente, como por ejemplo *al menos 4* (cuantificador absoluto creciente), *la mayoría de* (cuantificador relativo creciente).

  Un cuantificador creciente se caracteriza por la siguiente relación:

$$Q(\alpha_1) \geq Q(\alpha_2) \ \ si \ \ \alpha_1 \geq \alpha_2$$

  **2. Cuantificadores decrecientes.** Los cuantificadores decrecientes son cuantificadores lingüísticos representados por conjuntos difusos con monotonía decreciente, como por ejemplo, *a lo sumo 4* (cuantificador absoluto decreciente), *la minoría de* (cuantificador relativo decreciente).

  Un cuantificador decreciente se caracteriza por la siguiente relación:

$$Q(\alpha_1) \leq Q(\alpha_2) \ \ si \ \ \alpha_1 \leq \alpha_2$$

  **3. Cuantificadores unimodales.** Los cuantificadores unimodales tienen una función de pertenencia que es primero creciente y luego decreciente, como por ejemplo, *aproximadamente 8* (cuantificador absoluto unimodal), *aproximadamente la mitad de* (cuantificador relativo unimodal).

Un cuantificador unimodal se caracteriza por la siguiente relación:

$$Q(\alpha_1) \leq Q(\alpha_2) \leq Q(\alpha_3) = 1 \geq Q(\alpha_4)$$

con $\alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \alpha_3 \leq \alpha_4$.

Note que estas dos clasificaciones son ortogonales y cualquier combinación es permitida.

Los cuantificadores lingüísticos se representan mediante un conjunto difuso con al menos un elemento totalmente incluido y otro completamente excluido.

De acuerdo a los alcances de nuestra propuesta, una pregunta natural está relacionada a cómo obtener el vector de pesos, $w_i$, asociado al operador de agregación OWA. Para ello existen diferentes maneras, en [173] Yager ha introducido una interesante manera de obtener dicho vector, $w$, de acuerdo al concepto de la mayoría difusa representada por medio de un cuantificador lingüístico relativo creciente, $Q$, lo que da mayor flexibilidad al operador de agregación [103]. Por lo tanto, el vector de pesos $w$ es calculado de la siguiente manera:

**Definición 24** *Un cuantificador relativo creciente en una escala numérica es una función* $Q : [0,1] \to [0,1]$ *cuya función de pertenencia está definida por:*

$$Q(x) = \begin{cases} 0, & if\, x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & if\, a\ < x < b, \\ 1, & if\, x \geq b, \end{cases} \tag{B.1}$$

*donde* $a, b \in [0,1]$ *y* $a < b$. $Q(x) \geq Q(y)$ *siempre que* $x \geq y$. *El vector de*

*pesos está determinado por la siguiente expresión:*

$$w_i = Q\left(\frac{i}{m}\right) - Q\left(\frac{i-1}{m}\right), \quad i = 1, .., m \tag{B.2}$$

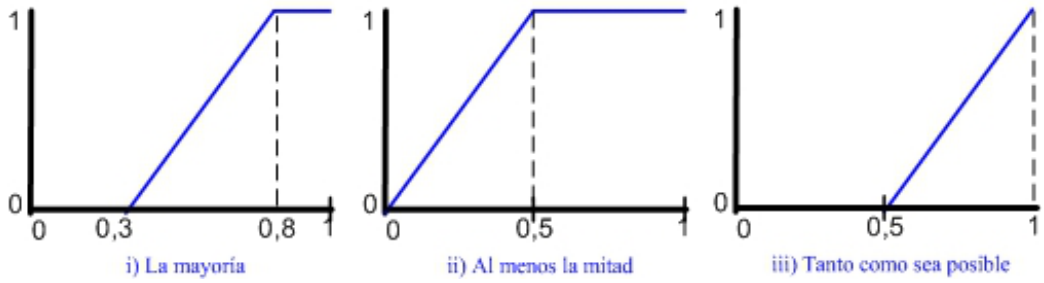



Figura B.1: Cuantificadores Lingüísticos Difusos Relativos.

Algunos ejemplos de cuantificador relativo creciente con sus parámetros $(a, b)$ son los siguientes (ver la función de pertenencia de cada uno de ellos en la Figura B.1):

- i) La mayoría. $(a, b) = (0.3, 0.8)$.
- ii) Al menos la mitad. $(a, b) = (0, 0.5)$.
- iii) Tanto como sea posible. $(a, b) = (0.5, 1)$.

Una vez que el cuantificador lingüístico apropiado ha sido seleccionado se procede a calcular el vector de pesos, $w_i$, usado en el proceso de agregación.

# Bibliografía

[1] R. Adolfs, D. Tranel, M. Hsu, M. Bahtt, and C. F. Camarer. Neural systems responding to degrees of uncertainty in human decision-making. *Science*, 310(5754):1680–1683, 2005.

[2] F. Aguiar. Teoría de la decisión e incertidumbre: Modelos descriptivos y normativos. *Empiria*, 8:139–160, 2004.

[3] C. Ahn and R. Ramakrishna. QoS provisioning dynamic connection-admission control for multimedia wireless networks using a Hopfield neural network. *Vehicular Technology, IEEE Transactions*, 53:106–117, 2004.

[4] W. Almesberger. Linux traffic control implementation overview. *Technical Report*, 2, Febrero 2001.

[5] B. Arfi. Fuzzy decision making in politics: A linguistic fuzzy-set approach (LFSA). *Political Analysis*, 13(1):23–56, 2005.

[6] M. Barreiros and P. Lundqvist. *QOS-Enabled Networks: Tools and Foundations*. Wiley Series on Communications Networking & Distributed Systems, 2011.

[7] A. Bechara, D. Tranel, and H. Damasio. Characterization of the decision-making deficit of patients with ventromedial prefrontal cortex lesions. *Brain*, 123:2189–2202, 2005.

[8] G.S. Becker. *The Economic Approach to Human Behavior*. University Of Chicago Press, Chicago, 1978.

[9] G. Beliakov, A. Pradera, and T. Calvo. *Aggregation Functions: A Guide for Practitioners*. Springer, Berlin, 2007.

[10] D. Bell, H. Raiffa, and A. Tversky. *Decision Making. Descriptive, Normative and Prescriptive Interactions*. Cambridge University Press, Cambridge, 1988.

[11] D. Ben-Arieh and Z. Chen. Linguistic group decision-making: Opinion aggregation and measures of consensus. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 5(4):371–386, 2006.

[12] D. Ben-Arieh and Z. Chen. Linguistic-labels aggregation and consensus measures for autocratic decision making using group recommendations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 36(3):558–568, 2006.

[13] K. Binmore. *La Teoría de Juegos: Una breve introduccion*. Alianza Editorial SA, 3° edition edition, 2009.

[14] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss. RFC 2475. An architecture for differentiated services. The Internet Engineering Task Force (IETF), 1998.

[15] R. Blum and C. Bresnahan. *Linux Command Line and Shell Scripting Bible*. Wiley Publishing, Indianapolis, 2011.

[16] P.P. Bonissone. A fuzzy sets based linguistic approach: Theory and applications. *In Approximate Reasoning in Decision Analysis (M.M. Gupta and E. Sanchez, eds.)*, pages 99–111, North-Holland Publishing Company, 1982.

[17] P.P. Bonissone and K.S. Decker. *Uncertainty in Artificial Intelligence*. North-Holland, 1986.

[18] G. Bordogna, M. Fedrizzi, and G. Pasi. A linguistic modeling of consensus in group decision making based on OWA operators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 27(1):126–132, 1997.

[19] G. Bordogna and G. Pasi. A fuzzy linguistic approach generalizing boolean information retrieval: A model and its evaluation. *Journal of the American Society for Information Science*, 44:70–82, 1993.

[20] P. Bosc, D. Kraft, and F. Petry. Fuzzy sets in database and information systems: status and opportunities. *Fuzzy Sets and Systems*, 156(3):418–426, 2005.

[21] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker. RFC 1633. Integrated services in the internet architecture: An overview. The Internet Engineering Task Force (IETF), 1994.

[22] R. Braden, E. Zhang, S. Berson, S. Herzog, and S. Jamin. RFC 2205. Resource ReSerVation Protocol (RSVP). The Internet Engineering Task Force (IETF), 1997.

[23] Z. Bubnicki. *Analysis and Decision Making in Uncertain Systems*. Springer-Verlag, Berlín/London/New York, 2004.

[24] J.J. Buckley. The multiple judge, multiple criteria ranking problem: A fuzzy set approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 13(1):25–37, 1984.

[25] A. Campbell, C. Aurrecoechea, and L. Hauw. A review of QoS architectures. *ACM Multimedia Systems Journal*, 6:138–151, 1996.

[26] J. Capone and I. Stavrakakis. Achievable QoS and scheduling policies for integrated services wireless networks. *Performance Evaluation*, 27-28(0):347 – 365, 1996.

[27] M.S. García Cascales and M.T. Lamata. Solving a decision problem with linguistic information. *Pattern Recognition Letters*, 28(16):2284–2294, 2007.

[28] E.J. Castellano and L. Martínez. A web-decision support system based on collaborative filtering for academic orientation. Case study of the spanish secondary school. *Journal of Universal Computer Science*, 15(14):2786–2807, 2009.

[29] S.L. Chang, R.C. Wang, and S.Y. Wang. Applying fuzzy linguistic quantifier to select supply chain partners at different phases of product life cycle. *International Journal of Production Economics*, 100(2):348–359, 2006.

[30] S.L. Chang, R.C. Wang, and S.Y. Wang. Applying a direct multi-granularity linguistic and strategy-oriented aggregation approach on the assessment of supply performance. *European Journal of Operational Research*, 177(2):1013–1025, 2007.

[31] T.H. Chang and T.C. Wang. A novel efficient approach for DFMEA combining 2-tuple and the OWA operator. *Expert Systems with Applications*, 37(3):2362–2370, 2010.

[32] S.J. Chen and C.L. Hwang. *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications.* Springer-Verlag, Berlín/ Nueva York, 1992.

[33] Y. Chen, X. Zeng, M. Happiette, P. Bruniaux, R. Ng, and W. Yu. Optimisation of garment design using fuzzy logic and sensory evaluation techniques. *Engineering applications of artificial intelligence*, 22(2):272–282, 2009.

[34] Z. Chen and D. Ben-Arieh. On the fusion of multi-granularity linguistic label sets in group decision making. *Computers and Industrial Engineering*, 51(3):526–541, 2006.

[35] H. Chernoff and L. Moses. *Elementary Decision Theory.* Dover Publications, Nueva York, 1986.

[36] F. Chiclana, F. Herrera, and E. Herrera-Viedma. Integrating three representation models in fuzzy multipurpose decision making based on fuzzy preference relations. *Fuzzy Sets and Systems*, 97:33–48, 1998.

[37] R.T. Clemen. *Making Hard Decisions. An Introduction to Decision Analisys.* Duxbury Press, 1995.

[38] D.E. Comer. *Internetworking with TCP/IP*, volume 1. Prentice Hall, 2005.

[39] R. Cooper. *Introduction to Queueing Theory.* North-Holland Publishing Company, New York, 1981.

[40] N. Cordeschi, V. Polli, and E. Baccarelli. Traffic engineering for wireless connectionless access networks supporting QoS-demanding media applications. *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 56(1):186–197, 2012.

[41] A. Coronato, G. De Pietro, A. Mazzeo, and L. Romano. Improving the QoS of MPEG2 streaming over wireless LANs. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11(7-8):533 – 555, 2003.

[42] D. Cotroneo, G. Iannello, S. Russo, and G. Ventre. A real time-based architecture for QoS multimedia provisioning. *Microprocessors and Microsystems*, 27(2):55 – 63, 2003.

[43] J. Daigle. *Queueing Theory for Telecommunications*. Addison-Wesley, EEUU, 1992.

[44] B. Davie, A. Charny, J. Bennett, K. Benson, J. Le Boudec, W. Courtney, S. Davari, V. Firoiu, and D. Stiliadis. RFC 3246. An expedited forwarding PHB (Per-Hop Behavior). The Internet Engineering Task Force (IETF), Marzo 2002.

[45] R. de Andrés, M. Espinilla, and L. Martínez. An extended hierarchical linguistic model for managing integral evaluation. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 3(4):486–500, 2010.

[46] R. de Andrés and J.L. García-Lapresta. An endogenous human resources selection model based on linguistic assessments. *Neural network world*, 20(1):91–111, 2010.

[47] R. de Andrés, J.L. García-Lapresta, and L. Martínez. A multi-granular linguistic model for management decision-making in performance appraisal. *Soft Computing*, 14(1):21–34, 2010.

[48] R. Degani and G. Bortolan. The problem of linguistic approximation in clinical decision making. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2:143–162, 1988.

[49] M. Delgado, J.L. Verdegay, and M.A. Vila. On aggregation operations of linguistic labels. *International Journal of Intelligent Systems*, 8(3):351–370, 1993.

[50] M. Delgado, M.A. Vila, and W. Voxman. On a canonical representation of fuzzy numbers. *Fuzzy Sets and Systems*, 94:125–135, 1998.

[51] Y.C. Dong, Y.F. Xu, and B. Feng H.Y. Li. The OWA-based consensus operator under linguistic representation models using position indexes. *European Journal of Operational Research*, 203:455–463, 2010.

[52] W. Dongrui and J.M. Mendel. Aggregation using the linguistic weighted average and interval type-2 fuzzy sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(6):1145–1161, 2007.

[53] J. Doyle. Prospects for preferences. *Computational Intelligence*, 20:111 136, 2004.

[54] D. Dubois and H. Prade. Fuzzy cardinality and the modeling of imprecise quantification. *Fuzzy Sets and Systems*, 16(2):199–230, 1985.

[55] D. Dubois and H. Prade. The three semantics of fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 90:141–150, 1997.

[56] M. Espinilla, J. Liu, and L. Martínez. An extended hierarchical linguistic model for decision-making problems. *Computational Intelligence*, 27(3):489–512, 2011.

[57] J. W. Evans and C. Filsfils. *Deploying IP and MPLS QoS for Multiservice Networks: Theory & Practice*. Morgan Kaufmann, 2007.

[58] J. Figueira, S. Greco, and M. Ehrgott. *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 2005.

[59] J. Fodor and M. Roubens. *Fuzzy preference modelling and multicriteria decision support*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994.

[60] R. Froom, M. Flannagan, and K. Turek. *Cisco Catalyst QoS: Quality of Service in Campus Networks*. Cisco Press, Indianapolis, 2003.

[61] T. Gal, T. Stewart, and T. Hanne. *Multicriteria Decision Making. Advances in MCDM models, Algorithms, Theory, and Applications*. Kluwer Academic Publishers, Norwell Massachusetts, 1999.

[62] J. Galindo, J. Medina, O. Pons, and J. Cubero. A server for fuzzy sql queries. In Troels Andreasen, Henning Christiansen, and Henrik Larsen, editors, *Flexible Query Answering Systems*, volume 1495 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 164–174. Springer Berlin / Heidelberg, 1998.

[63] L. Gheorghe. *Designing and Implementing Linux Firewalls with QoS using netfilter, iproute2, NAT and L7-filter*. Packt Publishing, Birmingham, UK, 2006.

[64] G. Giambene. *Queuing Theory and Telecommunications: Networks and Applications*. Springer, 1 edition, 2005.

[65] B. Gleeson, A. Lin, J. Heinanen, G. Armitage, and A. Malis. RFC 2764. A framework for IP based virtual private networks. The Internet Engineering Task Force (IETF), 2000.

[66] I. Gojmerac, F. Hammer, F. Ricciato, H. T. Tran, and T. Ziegler. Scalable QoS: state-of-the-art architectural solutions and developments. *Technical Report, FTW-TR-2004-003*, 2004.

[67] P.J. Groenen and K. Jajuga. Fuzzy clustering with squared Minkowski distances. *Fuzzy Sets and Systems*, 120:227–237, 2001.

[68] D. Grossman. RFC 3260. New terminology and clarifications for Diffserv. The Internet Engineering Task Force (IETF).

[69] O. Haitao, Z. Weidong, X. Runsheng, and X. Xiaoming. The QoS-MS of internet based on agent technology. In *Intelligent Control and Automation, 2000. Proceedings of the 3rd World Congress on.*, volume 1, pages 277 – 281, 2002.

[70] J. Heinanen, F. Baker, W. Weiss, and J. Wroclawski. RFC 2597. Assured forwarding PHB group. The Internet Engineering Task Force (IETF), Junio 1999.

[71] A. Helali, A. Soudani, S. Nasri, and T. Divoux. An approach for end-to-end QoS and network resources management. *Computer Standards & Interfaces*, 28(1):93 – 108, 2005.

[72] F. Herrera, S. Alonso, F. Chiclana, and E. Herrera-Viedma. Computing with words in decision making: Foundations, trends and prospects. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 8(4):337–364, 2009.

[73] F. Herrera and E. Herrera-Viedma (eds.). Computing with words: Foundations and applications, special issue. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems (IJUFKS)*, 9, 2001.

[74] F. Herrera and E. Herrera-Viedma. Aggregation operators for linguistic weighted information. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 27(5):646–656, 1997.

[75] F. Herrera and E. Herrera-Viedma. Choice functions and mechanisms for linguistic preference relations. *European Journal of Operational Research*, 120(1):144–161, 2000.

[76] F. Herrera and E. Herrera-Viedma. Linguistic decision analysis: steps for solving decision problems under linguistic information. *Fuzzy Sets and Systems*, 115:67–82, 2000.

[77] F. Herrera, E. Herrera-Viedma, and L. Martínez. A fusion approach for managing multi-granularity linguistic term sets in decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1):43–58, 2000.

[78] F. Herrera, E. Herrera-Viedma, and L. Martínez. A fuzzy linguistic methodology to deal with unbalanced linguistic term sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16(2):354–370, 2008.

[79] F. Herrera, E. Herrera-Viedma, and J.L. Verdegay. A sequential selection process in group decision making with a linguistic assessment approach. *Information Sciences*, 85(4):223–239, 1995.

[80] F. Herrera, E. Herrera-Viedma, and J.L. Verdegay. Direct approach processes in group decision making using linguistic OWA operators. *Fuzzy Sets and Systems*, 79:175–190, 1996.

[81] F. Herrera and L. Martínez. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(6):746–752, 2000.

[82] F. Herrera and L. Martínez. The 2-tuple linguistic computational model. Advantages of its linguistic description, accuracy and consistency. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 9:33–48, 2001.

[83] F. Herrera and L. Martínez. A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics - Part B: Cybernetics*, 31(2):227–234, 2001.

[84] F. Herrera, L. Martínez, and P.J. Sánchez. Managing non-homogeneous information in group decision making. *European Journal of Operational Research*, 166(1):115–132, 2005.

[85] E. Herrera-Viedma and A.G. López-Herrera. A model of information retrieval system with unbalanced fuzzy linguistic information. *International Journal Of Intelligent Systems*, 22(11):1197–1214, 2007.

[86] E. Herrera-Viedma, G. Pasi, A.G. López-Herrera, and C. Porcel. Evaluating the information quality of web sites: A methodology based on fuzzy computing with words. *Journal of American Society for Information Science and Technology*, 57(4):538–549, 2006.

[87] U. Hohle and S.E. Rodabaugh. *Mathematics of Fuzzy Sets: Logic, Topology and Measure Theory*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1999.

[88] B. Hubert, T. Graf, G. Maxwell, R. Van Mook, M. Van Oosterhout, P. Schroeder, J. Spaans, and P. Larroy. Linux advanced routing & traffic control. *Technical Report*, Octubre 2003.

[89] V.N. Huynh and Y Nakamori. A satisfactory-oriented approach to multi-expert decision-making under linguistic assessments. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-35(2):184–196, 2005.

[90] V.N. Huynh, C.H. Nguyen, and Y. Nakamori. MEDM in general multi-granular hierarchical linguistic contexts based on the 2-tuples linguistic model. *IEEE International Conference on Granular Computing*, pages 482–487, 2005.

[91] S. Ríos Insua, C. Bielza Lozoya, and A. Mateos Caballero. *Fundamentos de los Sistemas de Ayuda a la Decisión.* Ra-Ma, Madrid, 2002.

[92] Y.P. Jiang and Z.P. Fan. Property analysis of the aggregation operators for 2-tuple linguistic information. *Control and Decision*, 18:754–757, 2003.

[93] J. Kacprzyk. Group decision making with a fuzzy linguistic majority. *Fuzzy Sets and Systems*, 18:105–118, 1986.

[94] J. Kacprzyk and M. Fedrizzi. *Multiperson decision making models using fuzzy sets and possibility theory.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990.

[95] J. Kacprzyk, M. Fredizzi, and H. Nurmi. *Fuzzy Logic with Linguistic Quantifiers in Group Decision Making. In An Introduction to Fuzzy Logic Applications in Intelligent Systems.* Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA., 1992.

[96] J. Kacprzyk and S. Zadrozny. Computing with words in decision making: Through individual and collective linguistic choice rules. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 9(4):89–102, 2001.

[97] R. Keeney and H. Raiffa. *Decision with Multiple Objectives. Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 1993.

[98] G. J. Klir and B. Yuan. *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and Applications*. Prentice-Hall PTR, 1995.

[99] H.Y. Kung, M.H. Lin, and F.W. Kuo. Dynamic QoS queuing control mechanism for multimedia differentiated services. *Information Sciences*, 176(23):3453 – 3471, 2006.

[100] J. Lawry. A methodology for computing with words. *International Journal of Approximate Reasoning*, 28:51–89, 2001.

[101] J. Lawry. An overview of computing with words using label semantics. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 220:65–87, 2008.

[102] J. Liu, L. Martínez, H. Wang, R.M. Rodríguez, and V. Novozhilov. Computing with words in risk assessment. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 3(4):396–419, 2010.

[103] X. Liu and S. Han. Orness and parameterized RIM quantifier aggregation with OWA operators: A summary. *International Journal of Approximate Reasoning*, 48:77–97, 2008.

[104] J. Lu, G. Zhang, and D. Ruan. Intelligent multi-criteria fuzzy group decision-making for situation assessments. *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 36(1):18–26, 2008.

[105] J. Lu, G. Zhang, D. Ruan, and F. Wu. *Multi-Objective Group Decision Making. Methods, Software and Applications with Fuzzy Set Techniques*. Imperial College Press, 2007.

[106] R. D. Luce and P. Suppes. *Handbook of Mathematical Psychology. Cap. Preferences, utility and subject probability.* Wiley, New York, 1965.

[107] Z. Mammeri. Framework for parameter mapping to provide end-to-end QoS guarantees in IntServ/DiffServ architectures. *Computer Communications*, 28(9):1074 – 1092, 2005.

[108] O. Martin and G.J. Klir. On the problem of retranslation in computing with perceptions. *International Journal of General Systems*, 35(6):655–674, 2006.

[109] L. Martínez. Sensory evaluation based on linguistic decision analysis. *International Journal of Approximate Reasoning*, 44(2):148–164, 2007.

[110] L. Martínez, M.J. Barranco, L.G. Perez, and M. Espinilla. A knowledge based recommender system with multigranular linguistic information. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 1(3):225–236, 2008.

[111] L. Martínez, M. Espinilla, J. Liu, L.G. Pérez, and P.J. Sánchez. An evaluation model with unbalanced linguistic information: Applied to olive oil sensory evaluation. *Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing*, 15(2-3):2 29–251, 2009.

[112] L. Martínez, M. Espinilla, and L.G. Perez. A linguistic multigranular sensory evaluation model for olive oil. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 1(2):148–158, 2008.

[113] L. Martínez, J. Liu, D. Ruan, and J.B. Yang. Dealing with heterogeneous information in engineering evaluation processes. *Information Sciences*, 177(7):1533–1542, 2007.

[114] L. Martínez, J. Liu, J.B. Yang, and F. Herrera. A multigranular hierarchical linguistic model for design evaluation based on safety and cost analysis. *International Journal of Intelligent Systems*, 20(12):1161–1194, 2005.

[115] L. Martínez, D. Ruan, and F. Herrera. Computing with words in decision support systems: An overview on models and applications. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 3(4):382–395, 2010.

[116] L. Martínez and F. Herrera. An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: Extensions, applications and challenges. *Information Sciences*, 207:1–18, 2012.

[117] J.M. Mendel. An architecture for making judgement using computing with words. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*, 12(3):325–335, 2002.

[118] J.M. Mendel. Advances in type-2 fuzzy sets and systems. *Information Sciences*, 177(1):84–110, 2007.

[119] J.M. Mendel. Computing with words and its relationships with fuzzistics. *Information Sciences*, 177(4):988–1006, 2007.

[120] J.M. Mendel. Computing with words: Zadeh, Turing, Popper and Occam. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2(4):10–17, 2007.

[121] G.A. Miller. The magical number seven, plus or minus two. Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 101(2):343–352, 1955.

[122] T.M. Mitchel. *Machine Learning*. McGraw-Hill Science / Engineering / Math., New York, 1° edition edition, 1997.

[123] T. Miyoshi and H. Joichi. The improvement of web page retrieval by page grouping using fuzzy reasoning. *International journal of innovative computing information and control*, 2(1):237–247, 2006.

[124] J.N. Moderson and P.S. Nair. *Fuzzy Mathematics*. Physica-Verlag, New York, 1998.

[125] S. Mohamed and G. Rubino. A study of real-time packet video quality using random neural networks. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions*, 12(12):1071 – 1083, 2003.

[126] S. Nair and D. Novak. A traffic shaping model for optimizing network operations. *European Journal of Operational Research*, 180:1358–1380, 2007.

[127] K. Nichols, S. Blake, F. Baker, and D. Black. RFC 2474. Definition of the differentiated services field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 headers. The Internet Engineering Task Force (IETF), Diciembre 1998.

[128] N. Nithya and K. Duraiswamy. Efficient agent based QoS routing protocol for mobile ad-hoc networks. In *Control, Automation, Communication and Energy Conservation, 2009. INCACEC 2009. 2009 International Conference on*, pages 1–6, 2009.

[129] H. Nurmi. Assumptions of individual preferences in theory of voting procedures. *Springer-Verlag. Non-conventional preference relations in decision making. Berlin*, pages 142–155, 1988.

[130] S.A. Orlovski. Decision-making with fuzzy preference relations. *Fuzzy Sets and Systems*, 1:155–167, 1978.

[131] G. Pasi and R.R. Yager. Modeling the concept of majority opinion in group decision making. *Information Sciences*, 176:390–414, 2006.

[132] W. Pedrycz. *Fuzzy Modeling: Paradigms and Practice*. Kluwer Academic Publishers, 1996.

[133] W. Pedrycz and F. Gomide. *An introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design (Complex Adaptive Systems)*. Bradford Book, 1998.

[134] J.I. Peláez and J.M. Doña. LAMA: A linguistic aggregation of majority additive operator. *International Journal of Intelligent Systems*, 18(7):809–820, 2003.

[135] C. Porcel and E. Herrera-Viedma. Dealing with incomplete information in a fuzzy linguistic recommender system to disseminate information in university digital libraries. *Knowledge-based systems*, 23(1):32–39, 2010.

[136] R.M Rodríguez, L. Martínez, and F. Herrera. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20(1):109 – 119, 2012.

[137] W. Rong, L. Liang, and K. Liu. Pragmatic agent based QoS aware web services composition. In *Semantics, Knowledge and Grid, Third International Conference on*, pages 507 – 510, 2007.

[138] E. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon. RFC 3031. Multiprotocol label switching architecture. The Internet Engineering Task Force (IETF), Enero 2001.

[139] M. Roubens. Some properties of choice functions based on valued binary relations. *European Journal of Operational Research*, 40:309–321, 1989.

[140] M. Roubens. Fuzzy sets and decision analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 90:199–206, 1997.

[141] M. Roubens and Ph. Vincke. *Preference Modelling*. Springer-Velarg, Berlín/Heidelberg, 1985.

[142] S.H. Rubin. Computing with words. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 29(4):518–524, 1999.

[143] T. Saaty and M. Ozdemir. Why the magic number seven plus or minus two. *Mathematical and Computer Modeling*, 38(3):233–244, 2003.

[144] S. Shen, C.J. Chang, C.Y. Huang, and Q. Bi. Intelligent call admission control for wideband CDMA cellular systems. *Wireless Communications, IEEE Transactions*, 3(5):1810 – 1821, 2004.

[145] S. Shenker, C. Partridge, and R. Guerin. RFC 2212. Specification of guaranteed quality of service. The Internet Engineering Task Force (IETF), Septiembre 1997.

[146] S. Suehring and R. Ziegler. *Linux Firewalls*. Novell Press, Indianapolis, USA, 2005.

[147] T. Szigeti and C. Hattingh. *End-to-End QoS Network Design: Quality of Service in LANs, WANs, and VPNs*. Cisco Press, Indianapolis, 2004.

[148] T. Tanino. Fuzzy preference relations in group decision making. *In Non-Conventional Preference Relations in Decision Making (J.*

*Kacprzyk and M. Roubens, eds.)*, pages 54–71, Springer-Verlag, Berlin, 1988.

[149] V. Torra. Negation functions based semantics for ordered linguistic labels. *International Journal of Intelligent Systems*, 11:975–988, 1996.

[150] V. Torra. Aggregation of linguistic labels when semantics is based on antonyms. *International Journal of Intelligent Systems*, 16:513–524, 2001.

[151] E. Triantaphyllou. *Multi-criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000.

[152] C. Tsetsekas, G. Apostolos, and I. Venieris. Dynamic application profiles using neural networks for adaptive quality of service support in the internet. *Computer Communications*, 29(15):2985 – 2995, 2006.

[153] I.B. Türkşen. Type 2 representation and reasoning for CWW. *Fuzzy Sets and Systems*, 127:17–36, 2002.

[154] S. Vegesna. *IP Quality of Service*. Cisco Press, Indianapolis, 2001.

[155] B. Vermeulen, J. Wellen, F. Geilhardt, E. Weis, C. Mas, B. Dhoedt, and P. Demeester. End-to-end QoS resource management for an IP-based DWDM access network. *Lightwave Technology*, 22(1):2592–2605, 2004.

[156] J.H. Wang and J.Y. Hao. An approach to aggregation of ordinal information in multi-criteria multi-person decision making using choquet integral of fubini type. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 8:365–380, 2009.

[157] R.C. Wang and S.J. Chuu. Group decision-making using a fuzzy linguistic approach for evaluating the flexibility in a manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 154(3):563–572, 2004.

[158] S.Y. Wang. Applying 2-tuple multigranularity linguistic variables to determine the supply performance in dynamic environment based on product-oriented strategy. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16:29–39, 2008.

[159] Y.M. Wang and T.M. Elhag. A fuzzy group decision making approach for bridge risk assessment. *Computers and Industrial Engineering*, 53(1):137–148, 2007.

[160] G.W. Wei. A method for multiple attribute group decision making based on the ET-WG and ET-OWG operators with 2-tuple linguistic information. *Expert Systems with Applications*, 37:7895–7900, 2010.

[161] G.W. Wei and X.F. Zhao. Some dependent aggregation operators with 2-tuple linguistic information and their application to multiple attribute group decision making. *Expert Systems with Applications*, 39:5881–5886, 2012.

[162] J. Wroclawski. RFC 2211. Specification of the controlled-load network element service. The Internet Engineering Task Force (IETF), Septiembre 1997.

[163] Z.S. Xu. A method based on linguistic aggregation operators for group decision making with linguistic preference relations. *Information Sciences*, 166(1-4):19–30, 2004.

[164] Z.S. Xu. Induced uncertain linguistic OWA operators applied to group decision making. *Information Fusion*, 7(2):231–238, 2006.

[165] Z.S. Xu. On generalized induced linguistic aggregation operators. *International Journal of General Systems*, 35(1):17–28, 2006.

[166] R.R. Yager. A new methodology for ordinal multiobjective decisions based on fuzzy sets. *Decision Sciences*, 12:589–600, 1981.

[167] R.R. Yager. Reasoning with fuzzy quantified statements: Part I. *Kybernetes*, 14:233–240, 1985.

[168] R.R. Yager. Reasoning with fuzzy quantified statements: Part II. *Kybernetes*, 15:111–120, 1986.

[169] R.R. Yager. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 18:183–190, 1988.

[170] R.R. Yager. Connectives and quantifiers in fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 40(1):39 – 75, 1991.

[171] R.R. Yager. Families of OWA operators. *Fuzzy Sets and Systems*, 59:125–148, 1993.

[172] R.R. Yager. An approach to ordinal decision making. *International Joumal of Approximate Reasoning*, 12(3-4):237–261, 1995.

[173] R.R. Yager. Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 11(1):49–73, 1996.

[174] R.R. Yager. Decision making under uncertainty with ordinal information. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 7(5):483–500, 1999.

[175] R.R. Yager. On the retranslation process in Zadeh's paradigm of computing with words. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, 34(2):1184–1195, 2004.

[176] R.R. Yager. Aggregation of ordinal information. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 6(3):199–219, 2007.

[177] R.R. Yager. Concept representation and database structures in fuzzy social relational networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 40(2):413–419, 2010.

[178] M. Yang, Y. Huang, J. Kim, M. Lee, T. Suda, and M. Daisuke. An end-to-end QoS framework with on-demand bandwidth reconfiguration. *Computer Communications*, 28(18):2034 – 2046, 2005.

[179] W. Yang and Z.P. Chen. New aggregation operators based on the choquet integral and 2-tuple linguistic information. *Expert Systems with Applications*, 39:2662–2668, 2012.

[180] A. Yazici and R. George. *Fuzzy Database Modeling*. Physica-Verlag, New York, 1999.

[181] L. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.

[182] L. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. part I. *Information Sciences*, 8(3):199–249, 1975.

[183] L. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. part II. *Information Sciences*, 8(4):301–357, 1975.

[184] L. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. part III. *Information Sciences*, 9(1):43–80, 1975.

[185] L. Zadeh. Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 94(2):103–111, 1996.

[186] L.A. Zadeh. A computational approach to fuzzy quantifiers in natural languages. *Computing and Mathematics with Applications*, 9:149 – 184, 1983.

[187] M. Zarghamia and F. Szidarovszky. Revising the OWA operator for multi criteria decision making problems under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 198(1):259–265, 2009.

[188] D. Zhang, J. Jiang, A. Anani, and H. LI. QoS-guaranteed packet scheduling in wireless networks. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 16(2):63 – 67, 2009.

[189] Y. Zhang and Z.P. Fan. An approach to linguistic multiple attribute decision-making with linguistic information based on ELOWA operator. *Systems Engineer*, 4:98–101, 2006.

[190] S.M. Zhou, R.I. John, F. Chiclana, and J.M. Garibaldi. On aggregating uncertain information by type-2 OWA operators for soft decision making. *International Journal of Intelligent Systems*, 25(6):540–558, 2010.

[191] H.J. Zimmermann. *Fuzzy Sets: Theory and its Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.

[192] C. Zopounidis and M. Doumpos. *Intelligent Decision Aiding Systems Based On Multiple Criteria For Financial Engineering.* Kluwer Academic Publishers, 2000.