



# Estrategia de calidad de servicio (QoS) para tráfico de aplicaciones de hospitalización domiciliaria

Fernando Eliécer Ávila Berrío

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Medellín, Colombia  
2016



# Estrategia de calidad de servicio (QoS) para tráfico de aplicaciones de hospitalización domiciliaria

**Fernando Eliécer Ávila Berrío**

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería de Telecomunicaciones**

Directora:  
PhD. Natalia Gaviria Gómez

Línea de Investigación:  
Comunicaciones Inalámbricas  
Grupo de Investigación:  
Grupo de Investigación en Telecomunicaciones Aplicadas - GITA

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Medellín, Colombia  
2016



# Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en la Universidad de Antioquia dentro del marco del proyecto *"Plataforma tecnológica para los servicios de Teleasistencia, Emergencias médicas, seguimiento y monitoreo permanente a los pacientes y apoyo a los programas de promoción y prevención"* de la Alianza Regional en Tecnologías de la Información y la Comunicación Aplicadas (*Artica*), financiado por el Sistema General de Regalías.



## Resumen

Proveer Calidad de Servicio (*QoS*) es un requerimiento obligatorio cuando se requiere transmitir tráfico de telemedicina, debido a la importancia de la información sobre el estado de salud del paciente. La Administración Activa de Colas (*AQM*) se ha convertido en una estrategia ampliamente elegida para proporcionar QoS, porque no requiere interacción con los equipos de comunicación de la red. Este documento propone un nuevo esquema de control de acceso basado en ocupación de colas y la definición de 3 clases de tráfico. Esto con el objetivo de ofrecer las mejores características de QoS a las altas prioridades, mediante la adaptación de la probabilidad de rechazo del tráfico de llegada.

**Palabras clave:** QoS, AQM, Telemedicina, Priorización de tráfico.

## Abstract

Quality of Service (*QoS*) provision is a mandatory requirement when transmitting telemedicine traffic, because of the relevance of the information for the patient's health. Active queue management (*AQM*) has become a widely chosen strategy to provide QoS, since it does not require interaction with network equipment. This document proposes a new access control scheme based on the occupation of the queue and the definition of 3 classes of traffic. The goal is to offer better QoS to higher priorities, by adapting the rejection probability of the incoming traffic.

**Keywords:** QoS, AQM, Telemedicine, Traffic prioritization.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.2.1 Objetivo general . . . . .	4
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	4
1.3 Estructura del documento . . . . .	4
<b>2 Marco teórico y estado del arte</b>	<b>5</b>
2.1 Calidad de servicio para telemedicina . . . . .	5
2.1.1 Requerimientos y métricas de QoS . . . . .	5
2.1.2 Estrategias utilizadas para QoS en telemedicina con control . . . . .	10
2.1.3 Estrategias utilizadas para QoS en telemedicina sin control . . . . .	13
2.2 Estrategias de gestión de encolamiento . . . . .	14
2.3 Características generales sobre AQM . . . . .	17
2.3.1 Congestión . . . . .	17
2.3.2 Control de congestión en dispositivo final . . . . .	18
2.3.3 Algoritmos de red . . . . .	18
2.3.4 Componentes de AQM . . . . .	20
2.3.5 Diseño de AQM . . . . .	21
2.3.6 Desempeño AQM . . . . .	21
2.3.7 Equidad . . . . .	22
2.3.8 QoS y AQM . . . . .	23
<b>3 Elección de la estrategia de gestión de encolamiento y escenario de simulación</b>	<b>26</b>
3.1 Escenario de simulación . . . . .	26
3.2 AQM basada en RED . . . . .	29
3.2.1 rb n-RED . . . . .	30

---

3.2.2	Análisis de aportes y falencias de rb-nRED . . . . .	36
3.2.3	Resultados de simulación . . . . .	39
3.3	Estrategia de AQM propuesta para QoS en tráfico de telemedicina . . . . .	40
3.3.1	Probabilidad de rechazo . . . . .	42
3.3.2	Prioridad en el servicio . . . . .	45
3.3.3	Resultados de simulación . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Planteamiento del experimento</b>	<b>49</b>
4.1	Unidad experimental . . . . .	50
4.2	Factores controlables . . . . .	50
4.3	Variable respuesta . . . . .	50
4.4	Tratamientos . . . . .	51
4.5	Número de réplicas y aleatorización de los tratamientos . . . . .	51
4.6	Hipótesis preliminares del experimento . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Resultados experimentales</b>	<b>55</b>
5.1	Retardo . . . . .	55
5.2	Tasa de Pérdida de Paquetes . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>63</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	63
6.2	Trabajo futuro . . . . .	64
	<b>Bibliografía</b>	<b>66</b>



# Lista de Figuras

2-1. Clasificación estrategias QoS telemedicina . . . . .	6
2-2. QoS telemedicina según control sobre la red . . . . .	9
2-3. Taxonomía AQM . . . . .	16
2-4. Características sobre las AQM . . . . .	17
3-1. Escenario de evaluación . . . . .	26
3-2. Control de congestión RED . . . . .	30
3-3. Factor de corrección rb n-RED . . . . .	32
3-4. Paquetes rojos rechazados probabilísticamente . . . . .	34
3-6. Paquetes verdes rechazados probabilísticamente . . . . .	35
3-5. Paquetes amarillos rechazados probabilísticamente . . . . .	35
3-7. Resultado tasa de servicio fija rb n-RED . . . . .	40
3-8. Resultado tasa de servicio variable rb n-RED . . . . .	41
3-9. Probabilidad de rechazo qob A-RED . . . . .	44
3-10. Seudocódigo de servicio qob A-RED . . . . .	45
3-11. Presencia de ráfaga - %Pérdida de Paquetes . . . . .	46
3-12. Presencia de ráfaga - Retardo . . . . .	47
3-13. Relación entre tasas - %Pérdida de Paquetes . . . . .	47
3-14. Relación entre tasas - Retardo . . . . .	47
4-1. Diseño Experimental . . . . .	49
5-1. Resultados de retardo para el factor $K$ . . . . .	56
5-2. Resultados de retardo para el factor $R_p$ . . . . .	57
5-3. Resultados de PLR para el factor $K$ . . . . .	59
5-4. Resultados de PLR para el factor $R_p$ . . . . .	60



# Lista de Tablas

2-1. Parámetros de QoS por servicio de telemedicina . . . . .	7
2-2. Parámetros de QoS por aplicación de telemedicina . . . . .	8
2-3. Parámetros de QoS por tipo de dato de telemedicina . . . . .	9
2-4. Cuadro resumen estrategias con control . . . . .	12
2-5. Cuadro resumen estrategias sin control . . . . .	15
2-6. Estrategias de AQM basadas en RED . . . . .	25
3-1. Señales de cada prioridad . . . . .	27
4-1. Tratamientos . . . . .	51
4-2. Orden de los tratamientos . . . . .	52
5-1. Estadísticos para el Retardo . . . . .	55
5-2. ANOVA Retardo Prioridad uno . . . . .	56
5-3. ANOVA Retardo Prioridad dos . . . . .	57
5-4. ANOVA Retardo Prioridad tres . . . . .	57
5-5. Estadísticos para la Tasa de Pérdida de Paquetes . . . . .	58
5-6. ANOVA PLR Prioridad uno . . . . .	61
5-7. ANOVA PLR Prioridad dos . . . . .	61
5-8. ANOVA PLR Prioridad tres . . . . .	61



# 1 Introducción

El crecimiento que han tenido las TIC en las últimas décadas ha permitido que múltiples servicios se apoyen en sus beneficios, obteniendo de esta forma mejores resultados operacionales y económicos. Sin embargo, a pesar de los excelentes resultados no está todo hecho y son muchas las cosas que desde las TIC se pueden seguir aportando incluso en el aspecto del bienestar de las personas. Es precisamente esa oportunidad la que despierta motivación para el desarrollo de nuevas estrategias en comunicaciones, software y tecnologías que permitan el acceso oportuno, global y de calidad a los servicios que suplen las necesidades básicas de las personas.

En el área de la salud, el término telemedicina se refiere al uso de las tecnologías de las comunicaciones para ofrecer servicios de salud de forma remota con los mismos cuidados que se ofrecen en la institución hospitalaria; monitoreo de signos vitales, tratamiento terapéutico, revisiones médicas, electrocardiogramas y rayos x, son algunos de los servicios más utilizados en telemedicina [66]. En el marco de la telemedicina, el modelo de hospitalización domiciliaria permite a los pacientes acceder a los cuidados médicos que requieren desde su entorno familiar. Esta alternativa consiste en ofrecer a los pacientes en su domicilio un conjunto de atenciones y cuidados médicos y de enfermería de rango hospitalario, tanto en calidad como en cantidad, cuando ya no precisan de la estadía permanente en la infraestructura hospitalaria, pero que todavía necesitan vigilancia activa y asistencia compleja [21].

La hospitalización domiciliaria en el ámbito Colombiano se ha enfocado en la atención de pacientes con enfermedades crónicas. Según el Análisis de Situación de Salud en Colombia para el año 2014 realizado por el Ministerio de Salud y la Protección Social [52], la enfermedad renal crónica (ERC) es categorizada como catastrófica o ruinoso por los altos costos que implica su tratamiento, y explica que uno de los principales precursores de esta enfermedad es la hipertensión arterial con un 5.53% de la prevalencia en servicios de salud.

El análisis de este modelo, permite encontrar importantes aspectos donde las TIC pueden aportar a que sea más efectivo para el sistema de salud y los pacientes, permitiendo interactividad, comunicación en tiempo real, disponibilidad de atención inmediata las 24 horas del día y reducción de costos al sistema de salud. La información generada en el marco de estos servicios se debe enviar hasta un sistema de almacenamiento central al que los médicos pueden acceder para realizar los respectivos análisis y diagnósticos de los avances en la salud

del paciente. Sin embargo, se debe prestar especial atención al tratamiento y la transmisión de la información, la cual puede degradarse a causa del canal de comunicación que se utilice. Generalmente, las instituciones hospitalarias no cuentan con sistemas de comunicación privados que ofrezcan exclusividad a sus datos, y por tanto se hace necesario utilizar redes públicas como internet para la transmisión de los datos de telemedicina.

El problema de utilizar una red pública como internet, es que ésta no garantiza el cumplimiento de los requerimientos de Calidad de Servicio (QoS) que exige un tráfico tan sensible como el de telemedicina. Por tanto, si no se hace un tratamiento adecuado, la información del paciente podría no llegar oportunamente hasta el sistema de almacenamiento central, distorsionarse o, en el peor de los casos, perderse en el camino, situación que puede ser grave o incluso fatal si esa información contiene datos de emergencia acerca del paciente que está siendo monitoreado.

Garantizar QoS ha sido un tema estudiado para diferentes tipos de tráfico y diferentes escenarios [25] [24] [59], debido a que cada vez ha sido más importante que los servicios tengan respuestas más rápidas y eficientes en términos de retransmisiones y consumo de ancho de banda. En el escenario de la telemedicina, QoS se ha utilizado para obtener el menor retardo posible para conexiones y transmisión de información remota, buscando que la atención y/o monitoreo de pacientes sea lo más efectiva posible y así extender la atención médica a lugares apartados y de difícil acceso [47].

Si bien se han hecho avances en la prestación de servicios con criterios de calidad sobre internet, aún hay retos para garantizar los mínimos exigidos por servicios como la telemedicina. En este sentido, este documento presenta una estrategia basada en Administración Activa de Colas (AQM) que busca cumplir con los requerimientos de retardo (Delay) y tasa de pérdida de paquetes (packet loss rate) para este tipo de información específicamente. La estrategia propuesta utiliza un control adaptativo que prioriza la recepción de los paquetes de acuerdo con la ocupación de la cola, procurando que los paquetes con información más importante sean atendidos con prioridad, a la que hemos llamado qob A-RED.

## 1.1. Planteamiento del problema

Las enfermedades crónicas, por su característica de ser de larga duración, se convierten en uno de los factores que impactan de forma significativa el ámbito económico del sistema de salud Colombiano debido a la recurrencia de las citas y en ocasiones a las necesidades de hospitalización que son solicitadas por dichos pacientes. Mediante el modelo de atención en salud conocido como hospitalización domiciliaria, se ha buscado minimizar el efecto de este factor; sin embargo, la cuenta pendiente de este modelo, es ofrecer un acompañamiento

permanente al paciente que permita solucionar inquietudes que surjan entre visitas y eviten que el paciente recurra de emergencia a la institución hospitalaria cuando no es realmente necesario.

Este modelo de hospitalización domiciliaria ha tomado importancia a nivel mundial sobre todo por la inclusión de las TIC como apoyo al modelo, es así como desde 2005, la Organización Mundial de la Salud lidera el proyecto del Observatorio Global de E-Salud [4] en el cual se analizan los avances y las tendencias a nivel mundial de la adopción de servicios de E-Salud, y en el último boletín [65] se indica el crecimiento en la cantidad de países que tienen implementado alguno de los métodos sugeridos por esta organización mundial.

Para garantizar una correcta atención a la población de servicios de telemedicina que viene en aumento según el boletín [65] de la OMS, es muy importante para las instituciones hospitalarias que la información sobre las variables de salud monitoreadas a los pacientes que son atendidos bajo el modelo de hospitalización domiciliaria sea accesible por parte de los médicos dentro de un margen tolerable para el retardo en la recepción, la distorsión o la pérdida de información, ya que de estos datos se convierten en un factor clave en la toma de decisiones por parte del personal de medicina, y por ende en la mejora en el estado de salud del paciente.

En un proceso de transmisión de información, el gran desafío es vencer obstáculos como retardos o pérdida de paquetes, que se presentan en el canal de transmisión y que pueden repercutir en una recepción errónea o distorsionada de la información, y en el peor de los casos, la pérdida total de ésta. En consecuencia, es necesario que la transmisión de la información de los pacientes tenga un tratamiento adecuado de QoS; de tal forma que esta información logre sortear de la mejor manera posible los obstáculos descritos implícitos en cualquier sistema de comunicación.

Durante los últimos años, se han propuesto varias estrategias que buscan garantizar QoS en el tráfico de telemedicina; sin embargo, todas ellas están orientadas a escenarios particulares donde se tiene control sobre todos los equipos de la red, o se cuentan con características favorables propias del sistema de salud. El caso colombiano es particular en estos aspectos debido a que el sistema de salud colombiano no cuenta con redes propias destinadas para su operación; si una institución hospitalaria desea contar con un sistema de comunicación de datos privado, es necesario contratarlo a un operador de telecomunicaciones quien nunca dará control de sus equipos a la institución hospitalaria. Por ende es necesario desarrollar una solución que responda a las características del contexto local y ofrezca los requerimientos de QoS que exigen las aplicaciones de telemedicina, situación que da importancia al desarrollo de esta propuesta.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Plantear una estrategia de Calidad de Servicio (QoS) para el tráfico de aplicaciones de hospitalización domiciliaria que permita tener datos confiables y a tiempo en la institución hospitalaria.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Seleccionar los parámetros de calidad de servicio y los umbrales de aceptación para el tráfico de telemedicina, con base en las enfermedades seleccionadas.
- Analizar las características de las redes para el tráfico de telemedicina y seleccionar la más adecuada al objeto de estudio.
- Proponer una estrategia que permita características de calidad de servicio al tráfico de telemedicina.
- Implementar y comparar los resultados obtenidos en simulaciones de la técnica con los umbrales de aceptación de los parámetros de QoS.

## **1.3. Estructura del documento**

Este trabajo está organizado de la siguiente forma; en la sección 2 se presenta el marco teórico y el estado del arte donde se describen los diferentes trabajos realizados que tienen que ver con la propuesta de este trabajo, en la sección 3 se realiza la descripción detallada de la propuesta y su escenario de aplicación, en la sección 4 se describe y aplica el diseño experimental utilizado para la validación de la propuesta, en la sección 5 se realiza el análisis de los resultados obtenidos del experimento y en la sección 6 se presentan las conclusiones del trabajo y los aspectos que se recomiendan como trabajo futuro.

## 2 Marco teórico y estado del arte

La calidad de servicio, conocida también por su abreviatura en inglés QoS, ha sido definida desde varios puntos de vista dando enfoque al escenario donde se aplicará. En el marco del proyecto donde se aplica esta propuesta, QoS se define como la habilidad de proveer una diferente prioridad a cada aplicación, usuario o flujo de datos, para garantizar un cierto nivel de rendimiento en términos de tasa de bit, retardo, fluctuación, tasa de pérdida de paquetes y/o tasa de error de bit [69].

La telemedicina o la prestación de servicios de monitoreo domiciliario de salud se considera como un importante enfoque para mejorar la salud de las personas, especialmente aquellos que padecen enfermedades crónicas [56] [7]. Desde hace ya varios años, se vienen realizando investigaciones en todo el mundo sobre maneras de recolectar la información de las diferentes variables médicas de los pacientes de forma remota, lo cual involucra el proceso de transmisión hasta un lugar de almacenamiento seguro y de rápido acceso por parte de los médicos y especialistas de la salud [32].

Las estrategias propuestas para garantizar sobre QoS en telemedicina se pueden categorizar en 2 grupos generales: uno en el que se incluyen todas aquellas propuestas que requieren la modificación, intervención o acceso a los equipos utilizados en la comunicación que llamaremos “estrategias con control sobre los equipos de red”, y el otro donde se encuentran las estrategias que no requieren de este tipo de accesos o permisos que llamaremos “estrategias sin control”. La Figura 2-1 presenta la taxonomía de las estrategias, cuyos principios básicos se discuten en las secciones 2.1.1, 2.1.2 y 2.1.3.

### 2.1. Calidad de servicio para telemedicina

#### 2.1.1. Requerimientos y métricas de QoS

El tema de QoS para las señales médicas ha sido abordado desde varios puntos de vista enmarcados desde la naturaliza de la señal, de esta manera, estas señales se han caracterizado en cuanto a los parámetros de QoS desde un contexto del servicio, de la aplicación o del tipo de dato, permitiendo ser lo suficientemente específicos para abordar el problema a estudiar de manera particular.

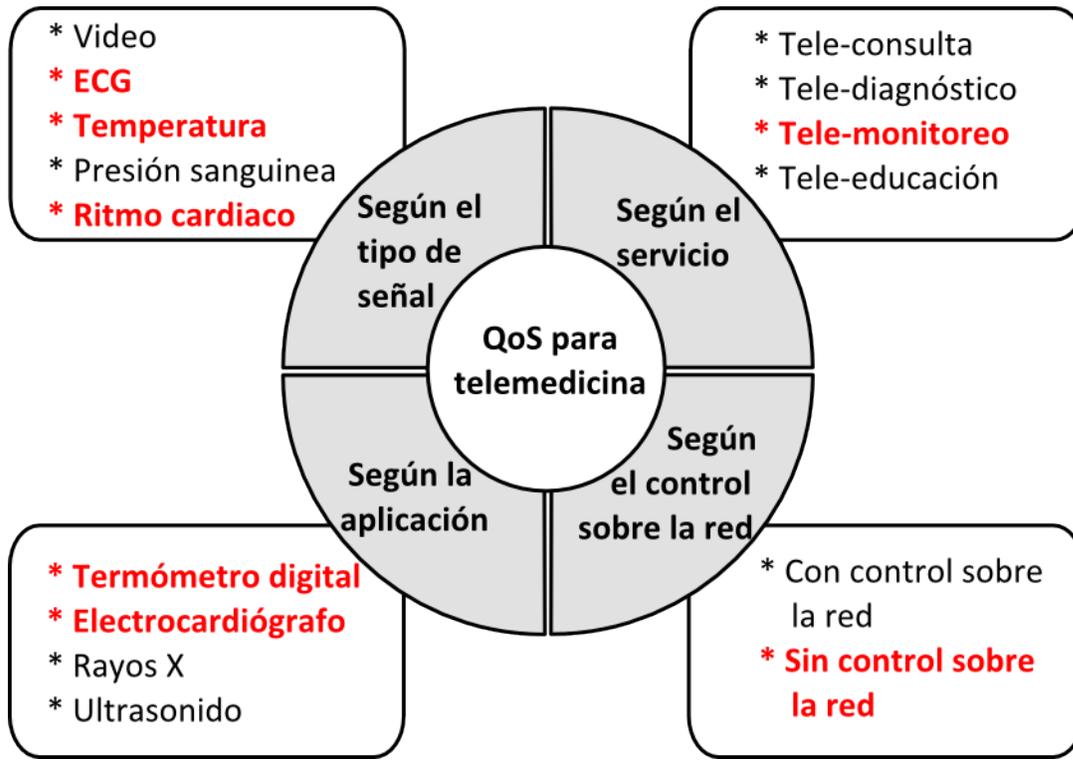


Figura 2-1: Clasificación estrategias QoS telemedicina

Por servicio se refiere al tipo de escenario que se utiliza para el propósito general de la investigación; en este encontramos categorías como tele-consulta, tele-monitoreo, tele-educación, tele-diagnóstico [69] [62] [58] [61], bases de datos, audioconferencia [45], entre otros.

La tele-consulta está orientada a ofrecer servicios de atención médica básica mediante una consulta que se realiza por videoconferencia y donde se requiere la manipulación de bases de datos donde se registra el historial clínico del paciente. Tele-monitoreo está enfocado a la supervisión en tiempo de real de los signos vitales de los pacientes que están en ubicaciones remotas<sup>1</sup>. Tele-educación se refiere a la utilización de los sistemas de telecomunicaciones para ofrecer asesoría o instrucciones médicas en situaciones de no-emergencia. Tele-diagnóstico se basa en la recolección y transmisión de los signos vitales del paciente los cuales son almacenados en un servidor para luego ser revisados de manera asíncrona por un especialista el cual emite un diagnóstico [58].

La valoración de estos servicios se ha realizado con niveles cualitativos de acuerdo a la exigencia que tiene cada uno de éstos en los parámetros de QoS [62]. Para los requerimientos de ancho de banda utilizan los valores de Alto y Bajo y para los parámetros de retardo y la

<sup>1</sup>Entiéndase ubicaciones remotas como lugares alejados del centro hospitalario que ofrece el servicio

**Tabla 2-1:** Parámetros de QoS por servicio de telemedicina

Tipo de servicio	BW requerido	Soporta Delay	Soporta Jitter	Estados de emergencia
Tele-Consulta	Alto	Si	Si	Si
Tele-Diagnóstico	Alto	Si	No	Si
Tele-Monitoreo	Bajo	No	No	Si
Tele-Educación	Alto	No	No	No
Historia Digital	Alto/Bajo	No	No	Si

variación del retardo entre paquetes (*jitter*) señalan si el servicio es afectado (Si) o no (No) por estos parámetros.

El autor en [58] consideró dos características básicas para la estimación de los valores a cada parámetro de QoS, las cuales se enfocan en si el servicio requiere transmisión de información en tiempo real o si la aplicación requiere transmisión casi de tiempo real; adicional a esto, también considera si el servicio dentro de sus funciones tiene la capacidad de enviar eventos de emergencia médica que por su naturaleza necesitan ser transmitidos en tiempo real.

El contexto por aplicación incluye la videoconferencia, estetoscopio, ecografía, ultrasonido, Rayos X, etc [12] [62] [58] [61]. Estas aplicaciones están presentes en la mayoría de soluciones y proyectos sobre telemedicina, ya que son las herramientas médicas más comúnmente utilizadas para realizar diagnósticos, evaluar avances en la salud del paciente o conocer de forma precisa el estado de salud actual del paciente. A partir de esto se ha realizado una valoración a partir de estas aplicaciones [62] pero también se ha hecho de forma más específica teniendo en cuenta que una videoconferencia la conforma el flujo de información de voz y video, una ecografía o rayos x es la transmisión de una imagen o un estetoscopio es una señal de intensidad variable, que son enmarcadas dentro del contexto por tipo de dato.

Para el contexto de las aplicaciones de telemedicina se tiene en cuenta las características de la señal, como por ejemplo muestras por segundo y cantidad de bits por muestra. A partir de estos datos se calcula la tasa de transmisión requerida para la correcta transmisión de la información que generan estas aplicaciones. La Tabla **2-2** muestra los datos calculados para los tipos de aplicación más comunes de telemedicina.

El contexto por tipo hace referencia a la naturaleza particular de la información que se va a transmitir, es decir; temperatura, ritmo cardíaco, saturación de oxígeno, presión sanguínea, audio, video, etc [69] [47] [6] [30] [58] [61] [11].

El audio es utilizado para recepción de la voz del paciente, o el sonido de alguno de los

**Tabla 2-2:** Parámetros de QoS por aplicación de telemedicina

Aplicación	Tasa de Tx requerida
Monitor de presión sanguínea	<10 kbps
Termómetro digital	<10 kbps
Electrocardiógrafo	≈15 kbps
Estetoscopio digital	≈120 kbps
Tomografía	250 kbps
Ultrasonido, cardiógrafo, radiógrafo	265 kB (tamaño de la imagen)
Resonancia magnética	384 kB (tamaño de la imagen)
Rayos X	1.8 MB (tamaño de la imagen)
Mamografía	24 MB (tamaño de la imagen)

servicios de telemedicina; este puede ser transmitido en tiempo real o de forma asíncrona y dependiendo de esto los requerimientos en cuanto a QoS pueden cambiar. En el caso de la transmisión en tiempo real, el audio toma características de tráfico UDP (*User Datagram Protocol*) por la necesidad de interactividad [45], lo que impide que se realice alguna retransmisión de la información debido a los problemas que esto implicaría para la correcta comunicación entre las personas. Esta particularidad hace que el audio cuando se utiliza en tiempo real requiera de condiciones más favorables para la transmisión y por lo tanto condiciones más exigentes en cuanto a los parámetros de QoS. Para el caso de la transmisión asíncrona de audio, como puede ser el caso de un audio pregrabado con recomendaciones médicas; los más común es realizarlo utilizando el protocolo TCP (*Transport Control Protocol*) que permite retransmisión de la información en caso de colisiones o pérdida de paquetes permitiendo un poco de flexibilidad en los parámetros de QoS, los cuales para este caso deben estar enfocados hacia garantizar velocidad de transmisión e integridad. En el caso del video, utilizado en comunicaciones de videoconferencia para servicios de tele-consulta, el tratamiento para la transmisión es similar al audio y se categoriza también en tráfico en tiempo real y tráfico asíncrono. De esta forma, los requerimientos pueden variar al igual que los datos de voz.

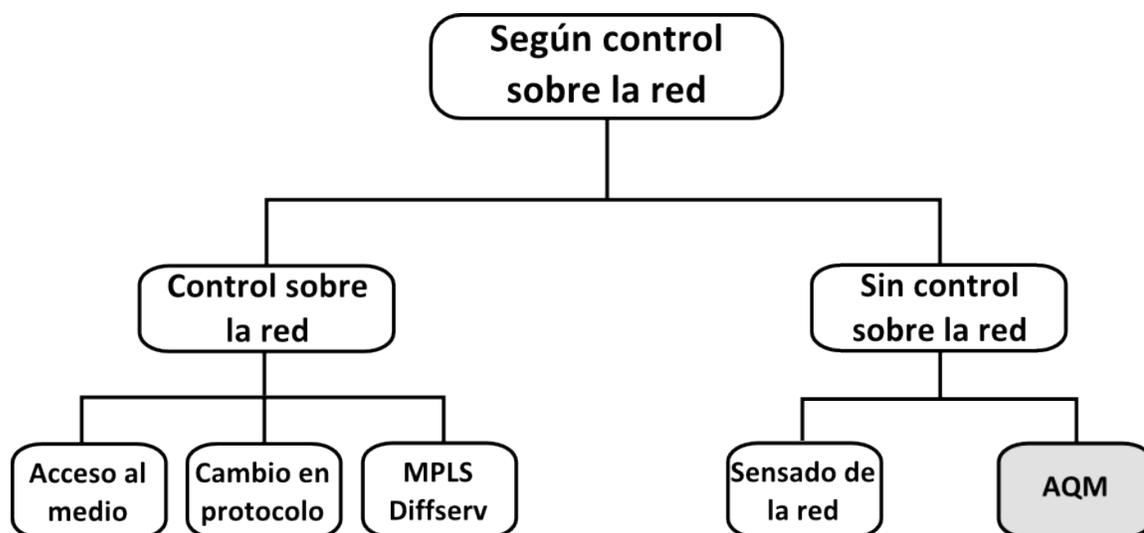
La temperatura, presión sanguínea, ritmo cardiaco, etc, han sido considerados como señales de signos vitales de los pacientes en varios trabajos [36] [58] donde además de establecer los valores a los parámetros de QoS para cada una de las señales, se ofrece un valor que representa la prioridad para el sistema [6] el cual resulta muy útil en caso de que haya la necesidad de tomar decisiones a la hora de transmitir información acumulada o con anchos de banda limitados. En la Tabla 2-3 se muestran los valores máximos tolerables de QoS para algunas de las señales más utilizadas en telemedicina.

Otra de las de las categorías por las cuales se ha clasificado las estrategias de QoS en tele-

**Tabla 2-3:** Parámetros de QoS por tipo de dato de telemedicina

Tipo de señal	Tasa de transmisión	Retardo máximo	PLR máximo
Audio	4-25 kbps	150-400 ms	3 %
Video	32-384 kbps	150-400 ms	1 %
ECG	1-20 kbps	≈1 s	0 %
FTP	N/D	N/D	0 %
Estadísticas del paciente	N/D	100 ms	0 %
Presión sanguínea	10 kbps	10 s	N/D
Respiración	10 kbps	5 s	N/D
Termómetro	10 kbps	60 s	N/D
SpO2	1 kbps	30 s	N/D
Detección de movimiento	50 kbps	5 s	N/D
Voz	100 kbps	5 s	N/D
Sonido de latidos	120 kbps	N/D	N/D
Temperatura	0.08 kbps	N/D	N/D
Ritmo cardíaco	0.6 kbps	N/D	N/D

medicina, es abordada desde el punto de vista según en control sobre la red, el cual que se puede observar en la Figura 2-2 y se amplía su alcance en la sección 2.1.2 y en la sección 2.1.3.

**Figura 2-2:** QoS telemedicina según control sobre la red

### 2.1.2. Estrategias utilizadas para QoS en telemedicina con control

Las estrategias con control hacen referencia a aquellas investigaciones que basan sus técnicas en la manipulación de algunos de los parámetros de configuración de los equipos de comunicación, bien sean routers, firewalls, switch, celdas celulares, etc, y que gracias a esto el tráfico que circula a través de estos equipos es diferenciado o priorizado en busca de garantizar los mejores valores en los parámetros de QoS de acuerdo al objetivo de cada investigación. Esta sección presenta una revisión de diferentes investigaciones que se han realizado con el objetivo de ofrecer QoS al tráfico de telemedicina, dentro de un escenario donde se cuenta con la posibilidad de realizar cambios en cualquiera de los equipos que componen el sistema.

Dentro de este grupo se encuentran investigaciones con diferentes enfoques, unas basadas en el uso o la modificación de los protocolos, otras en el análisis de tráfico, pero en general, todas con el objetivo principal de garantizar QoS. En el ámbito de las redes inalámbricas existe una investigación que realiza un esquema de reserva adaptativa de ancho de banda basado en la movilidad del paciente, combinado con un esquema de programación de tráfico de telemedicina bajo una red celular [53]. Este esquema realiza la reserva del ancho de banda mediante la identificación de las celdas contiguas a aquella en la que está asociado el paciente, utilizando la identificación de la MSC (*Mobile Switching Center*) para saber en qué celdas reservar ancho de banda previendo la movilidad del usuario y apoyándose además de un conocimiento previo por parte de la red de las trayectorias más comunes del usuario. La información se transmite utilizando un mecanismo de programación que se basa en la división del canal de subida en segmentos de longitud fija, que a su vez son divididos en ranuras de tiempo de tamaño fijo donde viaja la información. La programación del envío de la información se hace de acuerdo a una prioridad previamente definida y que va incluida en la cabecera de cada trama. Para el acceso al medio, este esquema se basa en la implementación de una técnica previamente desarrollada por los autores a la cual llamaron MI-MAC [40]; que modifica la estructura de los segmentos en el canal dándoles a estos un comportamiento más dinámico.

El trabajo reportado en [16] hace uso de la técnica Express Dual Channel (*EDC*) para la priorización de tráfico entre la puerta de enlace de la red de sensores que tiene el paciente y que monitorea sus signos vitales, y el AP (*Access Point*) que tiene configurado el enlace de comunicación hasta la institución hospitalaria. El enfoque de esta investigación aprovecha la inclusión de campos para QoS en el estándar 802.11e, al igual que las características de EDC para la transmisión de la información de telemedicina; para esto, el tráfico de la red de sensores se divide en dos: el tráfico que contiene los reportes periódicos con los signos vitales del paciente, y el tráfico impredecible de emergencia, que generalmente contiene información de alteraciones repentinas en la salud del paciente. Para realizar la transmisión, EDC divide en dos el canal de conexión inalámbrico con el AP; el canal primario se utiliza para la transmisión de la información de todos los usuarios del AP, y el segundo canal se utiliza para la

transmisión de mensajes cortos que le indican al AP que existe tráfico impredecible de emergencia, y es necesario transmitirlo inmediatamente. Una vez el AP recibe el mensaje corto por el segundo canal, éste envía un mensaje de broadcast a todos los dispositivos que tiene asociados indicándoles que deben parar de transmitir, y reserva el canal para la transmisión del tráfico de emergencia. Una vez se termina de transmitir la información de emergencia, el AP reestablece la comunicación con todos sus usuarios, y normaliza la transmisión por el primer canal. El objetivo principal de este mecanismo, es reducir el retardo en la transmisión de la información por parte de la puerta de enlace de la red de sensores hasta el AP que sirve de pasarela hacia el canal de comunicación con la institución hospitalaria.

En el ámbito de las redes cableadas existen una mayor cantidad de propuestas utilizando diferentes tecnologías de acceso, una de ellas por ejemplo es MPLS (*Multiprotocol Label Switching*) que es utilizado en 2 investigaciones [32] y [47]. MPLS es un protocolo muy amigable para proveer QoS a diferentes tipos de tráfico ya que ofrece muchas facilidades para la separación y el tratamiento especial de tráfico. En [32], los autores implementan MPLS en colaboración con DiffServ (*Servicios Diferenciados*) para el envío de tráfico de telemedicina. La estrategia consiste en utilizar DiffServ para la caracterización del tráfico, el encolamiento y la prioridad de la información de telemedicina; mientras que MPLS se utiliza para labores de ingeniería de tráfico, encargándose de elegir la mejor ruta para el envío de la información, de acuerdo al ancho de banda disponible y a la cantidad de saltos de router que hay de extremo a extremo. El trabajo presentado en [47], se basa también en MPLS y considera dos escenarios: uno donde el objetivo es controlar remotamente telerobots utilizando una comunicación con MPLS y el otro escenario que busca la comunicación con una sala de cuidados médicos remota llamada ViCCU (*Virtual Critical Care Unit*), para lo cual utiliza ATM (*Asynchronous Transfer Mode*).

Para el escenario del control de los telerobots, se utiliza un túnel VPN para la conexión remota por el cual viaja el tráfico manejado por el protocolo de reserva de recursos (*RSVP*) para el control de admisión de la conexión. En el escenario de la sala ViCCU, el tráfico de telemedicina es clasificado en tres grupos: tráfico de tasa de bit constante (*CBR*), tráfico de tiempo real y tasa de bit variable (*rt-VBR*) y tráfico que no es de tiempo real y tasa de bit variable (*nrt-VBR*). Este es enviado y tratado por los routers mediante ACL's (*Listas de Control de Acceso*) de acuerdo al tipo de tráfico.

Otro aspecto abordado para ofrecer calidad de servicio al tráfico de telemedicina es la conexión entre hospitales con el objetivo de compartir información [45]. En ésta se realiza una categorización del tipo de servicio (*ToS*), haciendo diferenciación entre los servicios que utilizan el protocolo TCP y los que usan el protocolo UDP. La estrategia consiste en la categorización de los ToS mediante la evaluación de tráfico TCP y UDP que existe entre las instituciones hospitalarias; esta categorización tuvo en cuenta el tamaño de los paquetes,

**Tabla 2-4:** Cuadro resumen estrategias con control

Referencia	Método	Red	Señales
[16] 2006	QoS mediante Express Dual Channel	WLAN	Eventos periódicos Eventos de emergencia
[45] 2006	QoS por tipo de servicio entre hospitales	LAN	Signos vitales Videoconferencia Bases de datos FTP
[47] 2007	QoS en red ATM y red con MPLS	VPN	Audio Video E-Mail FTP
[32] 2011	MPLS y DiffServ para el envío de tráfico de telemedicina con QoS	LAN	Audio Video Imagen
[53] 2011	Reserva de ancho de banda y programación de transmisión	3G	ECG Rayos X Imagen Video

el tiempo de transmisión, la tasa de transmisión y el tipo de información. Una vez se tiene categorizado todo el tráfico y definido la prioridad de cada ToS, la transmisión se planea empleando administración de buffer, métodos de control de flujo y administración activa de colas (*AQM*), cuyo resultado en combinación con la disponibilidad de recursos para la transmisión, determina el orden de envío de la información.

Como se puede observar, en las estrategias presentadas en esta sección se requiere la modificación de algún parámetro en los equipos para que reconozcan los cambios hechos en los protocolos y se trate el tráfico de la manera que se espera. Igualmente, para cada una de estas estrategias se planteó un escenario de evaluación dentro del cual se aplicaron los cambios y modelos planteados, con el fin de evaluar valores obtenidos en los parámetros de QoS y validar la propuesta. En todos los casos esta validación fue favorable obteniendo como conclusión general la viabilidad de la propuesta en términos de ofrecer QoS al tráfico de telemedicina en cada escenario particular evaluado. En la Tabla 2-4 se muestra el resumen de las estrategias que requieren control sobre los equipos de la red para ofrecer QoS al tráfico de telemedicina.

### 2.1.3. Estrategias utilizadas para QoS en telemedicina sin control

Esta sección presenta un análisis de esquemas de QoS propuestos que no requieren control o modificaciones sobre los equipos de la red. En general, estas estrategias proponen modelos de transmisión o encolamiento de la información, buscando mejorar los valores en los parámetros de calidad de servicio mediante mecanismos que se ejecutan en el dispositivo fuente o destino de la información.

De forma general, se ha encontrado que la mayoría de las propuestas para QoS en telemedicina sin control se han enfocado en el ámbito inalámbrico, principalmente en las redes celulares debido a la movilidad y cobertura que ofrecen estas redes. En el uso de redes 3G por ejemplo, el grupo SaPiMa [2] del proyecto Fontane [1] de Alemania adelantó una propuesta basada en el uso de la ubicación del paciente [33], para lo cual se desarrolló un protocolo de control para el tráfico de telemedicina en redes celulares, el cual, mediante un algoritmo que combina el código de área de la red celular con el nivel de importancia de los datos médicos previamente establecido, define la prioridad de la transmisión de los pacientes que estén asociados a la red celular en esa misma área. Cada paciente cuenta con un teléfono inteligente, que sirve de interconexión entre la red de sensores y la red celular. El funcionamiento general se basa en que cada teléfono envía al TMC (*Tele-medicine Center*) el código de área de la celda a la que está asociado y el tipo de información que tiene para transmitir; el TMC verifica estos dos códigos y se encarga de establecer el orden de transmisión de cada uno de los teléfonos que se encuentren en la misma área con el objetivo de evitar colisiones, retardos o pérdida de paquetes generados por el tráfico de ellos mismos. Las simulaciones se basaron en la medición del retardo en la recepción de la información utilizando dos tipos de redes celulares diferentes: GSM (*Global System for Mobile communications*) y UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), obteniendo mejores resultados en la red UMTS, como era de esperarse por la mayor capacidad que ofrece esta tecnología en comparación con GSM.

Otra de las investigaciones que se desarrolló en redes celulares, particularmente en redes 3G, se enfoca en la separación mediante multiplexación de los flujos de información de telemedicina de acuerdo al tipo de tráfico. En este caso, el escenario considera la transmisión desde una ambulancia que está permanentemente en movimiento y que les envía a través de la red UMTS la información sobre el estado de salud del paciente a los médicos que se encuentran en el hospital. La multiplexación se realiza usando 5 canales de acuerdo al tipo de información; donde el primero es para la señalización, el audio utiliza los canales 1, 2 y 3 a una tasa de 12,2kbps por canal y los otros tipos de datos se envían por el canal 4 a tasas de 64, 48, 32 o 12 Kbps según el tipo de tráfico. A pesar de contar con canales independientes para cada tipo de tráfico debido a la multiplexación, no se presenta un esquema de priorización o acceso diferenciado al canal. La comparación de los resultados de las simulaciones se hizo frente a las especificaciones técnicas de retardo y porcentaje de paquetes perdidos dados en

ETSI TS 123 107 V5.9.0 [10] las cuales fueron cumplidas en su totalidad.

Otra de las formas que se ha utilizado para ofrecer calidad de servicio al tráfico de telemedicina es mediante el análisis del estado de los recursos de la red de comunicación [37], en este caso utilizando la red 3.5G, buscando estimar la cantidad de ancho de banda disponible y programar la transmisión en base a esta estimación. Para este propósito, se utilizó un control de velocidad de transmisión multiobjetivo mediante un algoritmo de control de velocidad adaptativo basado en el autoaprendizaje. El algoritmo sensa la red para estimar el ancho de banda disponible, con base en un enfoque de predicción lineal con datos de lecturas de ancho de banda disponibles anteriores y cuyo resultado permite realizar el ajuste de velocidad de la transmisión que se aplica en la capa de aplicación. El proyecto de investigación se enmarcó en mejorar los resultados en los límites de QoS del sistema OTELO (*mObile Tele-Echography using an ultra-Light rObot*) [31].

En el mismo enfoque de análisis de la red pero con el objetivo de crear un referente de estimación, se desarrolló un analizador llamado BSA (*Biomedical Sensing Analyzer*) [6]. El objetivo fue establecer los límites de retardo tolerables de cada tipo de tráfico de telemedicina y así tener un criterio de estimación de QoS, para lo cual se realizó un banco de pruebas iniciales en un escenario óptimo enviando ráfagas de pulsos delta Dirac y tomando los tiempos de recepción en el otro extremo bajo una red de comunicación LTE (*Long Term Evolution*). La transmisión de la información se realiza utilizando un teléfono inteligente como puerta de enlace hacia la red celular; este teléfono inteligente tiene un software instalado que marca la prioridad de los paquetes a enviar, y de acuerdo a los resultados de BSA acondiciona la transmisión para el cumplimiento de los parámetros de QoS para cada tipo de tráfico.

Un resumen que contiene las características generales de cada técnica de QoS en la transmisión de señales de telemedicina se puede ver en la Tabla 2-5.

## 2.2. Estrategias de gestión de encolamiento

La Administración Activa de Colas AQM (*Active Queue Management*), se ha desarrollado buscando dar solución a los problemas de congestión debido al crecimiento de las redes; más específicamente, se ha enfocado en ofrecer recursos de control de congestión al protocolo TCP buscando limitar el retardo y la pérdida de paquetes [5].

Una de las estrategias más conocidas en AQM es el algoritmo de Detección Aleatoria Temprana - RED (*Random Early Detection*) [29] que se basa en un programador de red para el envío de paquetes con el objetivo de evitar la congestión. Además, AQM ha servido de mecanismo para estrategias de diferenciación como DiffServ que de la mano de la Calidad

**Tabla 2-5:** Cuadro resumen estrategias sin control

Ref	Método	Red	Señales
[45] 2006	Diferenciación por tipo de servicio y priorización utilizando AQM	LAN	Audio Video Signos Vitales
[31] 2006	Multiplexación y velocidad diferenciada a cada canal	UMTS	Audio Video ECG FTP
[37] 2009	Sensado de la red y ajuste de velocidad de transmisión	3.5G	Ultrasonido Video Imagen
[11] 2011	Almacenamiento en 2 cola M/G/1 y priorización por tipo de tráfico	WPAN	Audio Video Temperatura
[33] 2012	Servidor que ordena la prioridad de transmisión de los pacientes	3G	Estado de salud del paciente Signos Vitales
[6] 2013	Sensado de la red y priorización de señales en el teléfono	LTE	Simulación de pulsos

de Servicio – QoS buscan disminuir el retardo extremo a extremo, la variación del retardo entre paquetes y la tasa de pérdida de paquetes de acuerdo a unos niveles de servicio - SLA's (*Service Level Agreements*) previamente declarados.

A partir de la aparición de una de las primeras estrategias de AQM en el año de 1993 cuando se propuso el algoritmo RED, se han adelantado diferentes investigaciones que han dado como resultado diversas estrategias en lo que respecta con la forma de abordar los problemas y el resultado que se busca obtener. En busca que entender mejor las diferencias entre estas estrategias, se ha propuesto una taxonomía que las clasifica dependiendo de su particularidad como por ejemplo: el mecanismo de operación, el contexto de uso o el desempeño que se busca obtener con la estrategia con respecto a un criterio específico. Igualmente, cada uno de estos criterios se puede desglosar en subcriterios buscando la especificidad de la estrategia. En la Figura 2-3 se puede observar la taxonomía propuesta en [5] con sus respectivas características.

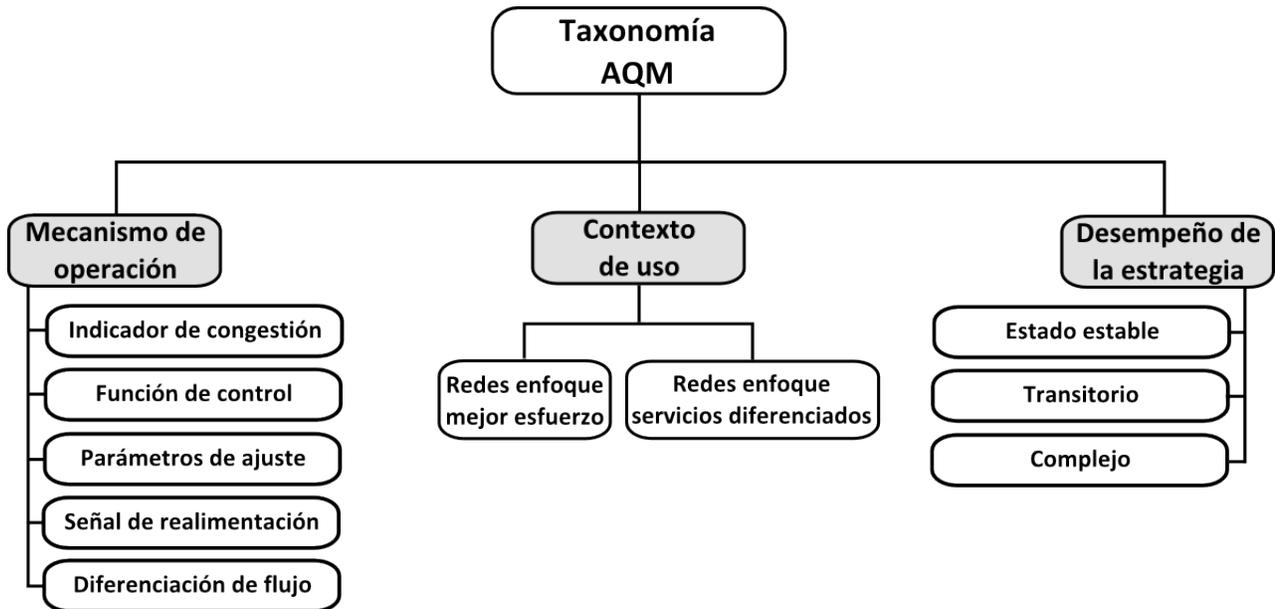


Figura 2-3: Taxonomía AQM

- Clasificación por mecanismos de operación.

Estas estrategias se diferencian por el mecanismo utilizado para la toma de decisiones de rechazo de los paquetes en la cola, en este plano se han encontrado propuestas que se enfocan en obtener indicadores de congestión basados en colas, en tasas, en paquetes perdidos o en la combinación de varios de éstos; también propuestas que buscan desarrollar funciones de control lineal, no lineal, óptimo, robusto entre otros mediante técnicas heurísticas o de optimización; las hay también quienes buscan modificar los parámetros de funcionamiento de la estrategia de forma estática asignando valores fijos, de forma dinámica para que los parámetros obtengan los valores de acuerdo al comportamiento de la red o de forma mixta; además hay quienes trabajan con diferenciación de los flujos básicamente entre flujos TCP y flujos UDP y quienes se enfocan en obtener información de retorno mediante marcas de notificación de congestión o detección de paquetes perdidos.

- Clasificación por contexto de uso.

La clasificación por contexto está orientada hacia el escenario donde se aplica la estrategia, bien sea en un escenario de comunicación elástico o inelástico, con transmisiones periódicas o aleatorias, etc. En todas estas categorías se abordan las estrategias diferenciando entre las aplicables a redes cableadas, las aplicables a redes inalámbricas y las que aplican a cualquiera de las dos formas de comunicación, incluso diferenciando entre los protocolos utilizados en la capa de transporte TCP o UDP.

- Clasificación por desempeño de la estrategia.

La clasificación por desempeño se realiza de acuerdo al comportamiento de diferentes factores implicados en la estrategia de AQM. Estos factores pueden ser el retardo, la variación del retardo entre paquetes, la memoria de ejecución, la pérdida de paquetes, la estabilidad de las colas, sensibilidad entre otros y que están clasificados en tres grandes marcos: los que tienen que ver con el comportamiento en estado estable de la estrategia, con el comportamiento transitorio y con la complejidad de esta.

## 2.3. Características generales sobre AQM

A continuación se describen las características generales con las que cuentan las estrategias de AQM buscando dar un contexto general de su funcionamiento, al igual que se busca dar una organización de cada uno de los conceptos. En la Figura 2-4 se observan en resumen los tópicos generales que son en esta sección.

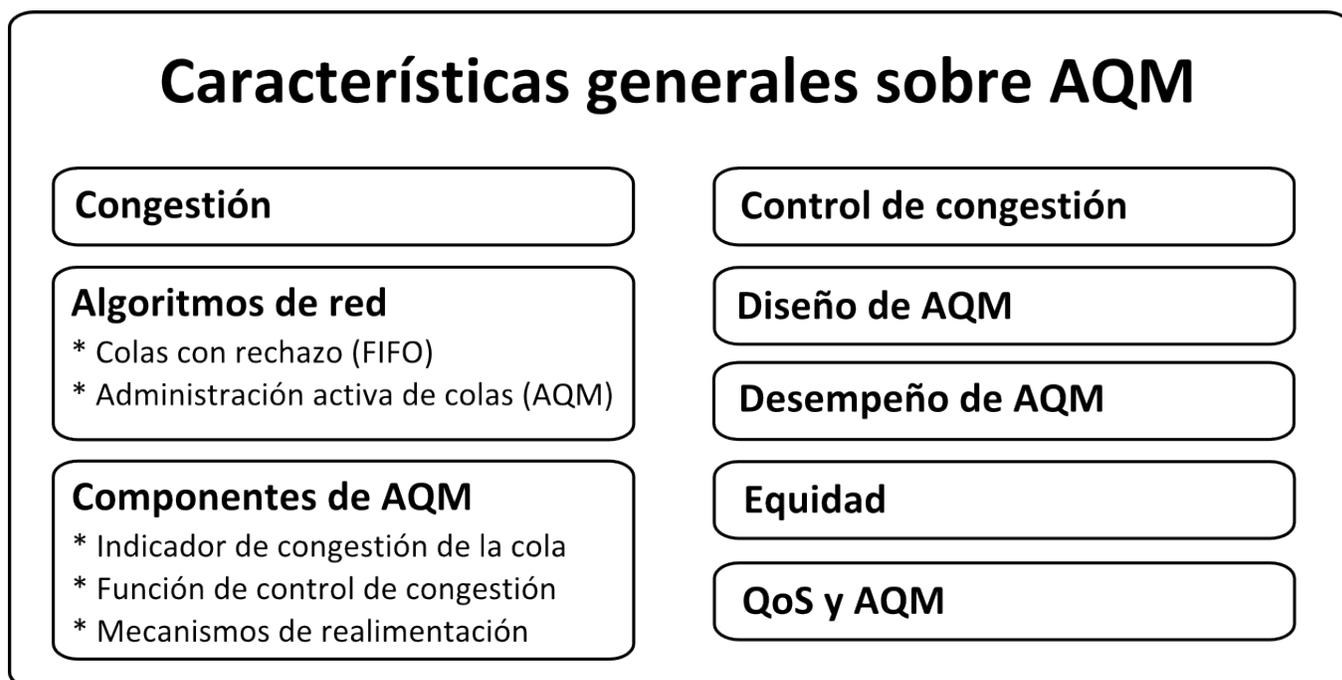


Figura 2-4: Características sobre las AQM

### 2.3.1. Congestión

La congestión se ha definido como el exceso de demanda hasta el punto de exceder la capacidad de los recursos disponibles [38], igualmente se puede definir como el exceso en la tasa de llegada con respecto a la tasa de salida disponible por la interfaz provocando un aumento

en el retardo y la pérdida de paquetes como consecuencia de que los tiempos de respuesta son muy altos incluso tendiendo a infinito [35].

El resultado que se obtiene cuando se presenta congestión generalmente es altos retardos en la transferencia de datos, recursos desaprovechados debido a la pérdida de paquetes, y en algunos casos el colapso de la estrategia de encolamiento, provocando que no haya transferencia de datos a través de la red.

Por esta razón es importante contar con un control de congestión que busque tener la red en un estado óptimo de funcionamiento donde se presenten bajos retardos y alta utilización de la red, incluso que funcione como control de recuperación en el caso que no se logre evitar la congestión.

### **2.3.2. Control de congestión en dispositivo final**

El objetivo de las estrategias y/o algoritmos de control de congestión en los dispositivos finales es recuperar el funcionamiento de la red después que ésta haya presentado un estado de congestión (*enfoque reactivo*) [55], para lo cual se han utilizado algoritmos y protocolos de la capa de aplicación y la capa de transporte, siendo esta última la que mayor concentración de opciones posee donde el protocolo TCP ha sido el más usado [8] [28] [39].

El problema que han presentado la mayoría de estas estrategias ha sido el manejo del retardo, principalmente en el escenario cuando la fuente de información obtiene la indicación de congestión por parte de la estrategia, ya que durante el tiempo que pasa mientras esta indicación es recibida, posiblemente se haya transmitido más información que incrementará el problema de congestión en la red. Para subsanar un poco este problema se han creado colas de datos en los router, sin embargo se ha evidenciado que ante buffer muy grandes se presentan grandes retardos en la cola especialmente cuando hay presencia de congestión, y pequeñas colas produce un incremento en el número de paquetes perdidos por lo que ha sido especialmente difícil tener una alta utilización de los enlaces con bajos retardos en las colas [28].

### **2.3.3. Algoritmos de red**

Los algoritmos de red se dividen en dos tipos: algoritmos de planificación o programación y algoritmos de administración de colas. Los primeros son aquellos que garantizan equidad en la asignación de ancho de banda a cada tipo de tráfico en la transmisión. Para este propósito estos algoritmos generan dos colas diferentes e independientes, una para un tipo de tráfico

particular y la otra para tráfico común o agregado y a la hora de transmitir, el algoritmo decide el orden en que el tráfico es transmitido de acuerdo al estado de cada cola [60].

Por otro lado, los algoritmos de administración de colas es el proceso por el cual un dispositivo decide si rechaza o no un paquete y en el caso de rechazar alguno, también está en la capacidad de decidir cuál paquete rechazar en su interfaz de salida cuando esta está congestionada o se está empezando a congestionar [14]. Este tipo de algoritmos son más fáciles de implementar, ya que en su funcionamiento básico solo requieren de una cola tipo FIFO (*Fisrt In Firts Out*) para todos los flujos. Los tipos de algoritmos de red más comunes son:

### 2.3.3.1. Colas con rechazo (Droptail)

Son colas tipo FIFO típicamente usadas en internet debido a la facilidad de implementación en los routers [55], sin embargo no favorecen esquemas de control de congestión como TCP ya que poco tráfico puede obtener una gran parte de ancho de banda bloqueando el resto de tráfico del enlace. Adicional a esto, este tipo de colas descartan cualquier otro paquete que llegue después de que se encuentra llena afectando incluso los mecanismos de sincronización de TCP y obligando a que el protocolo disminuya el tamaño de la ventana y por ende la tasa de transmisión.

Droptail posee un mecanismo que penaliza los flujos que tienen tiempo de recorrido más grande de forma inversamente proporcional, es decir, entre menos tiempo de recorrido tenga el flujo su rendimiento incrementará más rápidamente [42]; sin embargo, si las colas están completamente llenas, ambos flujos (de tiempo de recorrido pequeño y tiempo de recorrido grande) experimentarán paquetes descartados.

### 2.3.3.2. Administración activa de colas (AQM)

Es una estrategia de control de congestión proactiva en la cual la red informa a todas las fuentes de forma explícita utilizando ECN (*Notificación explícita de congestión*) o de forma implícita indicando los paquetes descartados, cuando se detecta un inicio de congestión [43]. Como respuesta a estos mensajes, las fuentes disminuyen su tasa de transferencia para evitar sobrecargas.

Para la detección de congestión en el enlace, AQM puede utilizar la longitud de la cola, la tasa de entrada o los eventos de buffer lleno y vacío [63]. Además de esto, puede realizar predicciones de los valores de retardo que podría presentar la cola manteniéndose por debajo de un tamaño de cola establecido, permitiendo que el rendimiento de la red sea independiente de la carga que presente evitando al máximo que se presenten paquetes descartados lo cual

beneficia a la alta utilización de los enlaces.

### **2.3.4. Componentes de AQM**

En un esquema de administración de colas existen 3 componentes principales que son: indicador de congestión que se encarga de decidir cuándo hay congestión; la función de control de congestión que se encarga de establecer qué hacer cuando se presenta una congestión y un mecanismo de retroalimentación que se encarga de indicar a la fuente que existe una congestión para que modifique su tasa de transmisión [68] [49] [41] [9]. Estos conceptos se definen independientemente a continuación.

#### **2.3.4.1. Indicador de congestión de la cola**

Como indicador se puede usar la tasa de arribo de los paquetes buscando que no exceda un porcentaje de utilización de la cola, o se puede utilizar también la longitud de la cola buscando que esta no sea muy grande, o se puede utilizar incluso una combinación de las estrategias. Para ambos se establecen valores límites que controlen el objetivo propuesto.

Algunas investigaciones han mostrado que podría ser mejor la estrategia de tasa de arribo en comparación con los resultados de la estrategia que mide la longitud de la cola [17], sin embargo también se ha establecido que el uso de ambas estrategias de forma conjunta da mejores resultados en estabilidad y capacidad de respuesta [43].

#### **2.3.4.2. Función de control de congestión**

Define la probabilidad de que un paquete entrante a la cola sea aceptado o rechazado. El tipo de función de control varía en términos de la cantidad de parámetros que sean utilizados, sin embargo, a pesar que la utilización de muchos parámetros puede ser útil para tener un mejor resultado de afinación en la función, también hace que esa afinación sea más difícil de conseguir [64].

#### **2.3.4.3. Mecanismos de realimentación**

Existen varias alternativas para cumplir con el objetivo de anunciar a la fuente que existe congestión, una de ellas es la utilizada por el protocolo TCP que se basa en la cantidad de retransmisiones realizadas, y otra es la utilización de ECN pero para esto es necesario que la fuente tenga capacidad de entender este tipo de notificaciones. Algunas investigaciones han

indicado que el uso de ECN resulta más estable [23].

### 2.3.5. Diseño de AQM

Para el diseño de la función de control de congestión se han utilizado dos enfoques diferentes, el enfoque heurístico [51] y el enfoque teórico [35]. Se ha encontrado que el enfoque heurístico ha ofrecido buenos resultados en cuanto al rechazo de paquetes en la cola, sin embargo, el hecho de tener que ajustar los parámetros para diferentes condiciones de la red ha hecho que se presenten momentos de inestabilidad y comportamiento lento.

En cuanto al enfoque teórico se ha trabajado en el entendimiento del funcionamiento del protocolo TCP y cómo este ha sido utilizado para el control de congestión, sin embargo, el gran problema que se ha encontrado es modelar de la forma más fidedigna el comportamiento de este protocolo en los diferentes escenarios de congestión para diferentes tipos de tráfico [27]. Por ejemplo, en TCP evitar la congestión provoca oscilaciones periódicas que modifican el tamaño de la ventana produciendo que los mensajes de pérdidas sean aleatorios [67]. Para el modelado se ha optado por utilizar modelos matemáticos de linealidad y estacionariedad, sin embargo la linealidad ha mostrado problemas cuando el punto de operación cambia abruptamente y la estacionariedad no es real porque se sabe que las condiciones de la red son variantes frecuentemente durante el tiempo [34].

### 2.3.6. Desempeño AQM

Los esquemas de AQM han buscado cumplir con los siguientes aspectos orientados a ofrecer un buen desempeño a la estrategia [5]:

- Estabilidad: Debe ser capaz de recuperarse ante eventos de falla.
- Robustez: Debe ser capaz de trabajar correctamente incluso en comportamientos adversos de la red o de condiciones poco favorables.
- Sensibilidad: Debe ser capaz de converger rápidamente a un punto de equilibrio.
- Escalabilidad: Debe estar en la capacidad de admitir el crecimiento de la velocidad, los enlaces y los routers.

Sin embargo, para algunos actores es claro que un esquema de AQM no necesariamente debe ser óptimo en todos los escenarios, y hay algunos casos donde será necesario sacrificar estabilidad por sensibilidad por ejemplo, o equidad por simplicidad.

Para lograr el mejor resultado en un esquema AQM planteado, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos que impactan directamente en el rendimiento de la estrategia [54]:

- El tamaño del bufer y la capacidad de los enlaces.
- Tráfico de la red y tiempo de viaje de los paquetes.
- La tasa de variabilidad de los flujos.
- La relación entre el enrutamiento y la congestión del enlace.
- La presencia de flujos de corta vida y flujos de larga vida.
- Asimetría en el camino inverso o camino de regreso.

### 2.3.7. Equidad

La equidad en un esquema de AQM se refiere a la manera de dar condiciones favorables a cada tipo de tráfico de acuerdo a sus características buscando que la transmisión sea la mejor posible para los diferentes flujos. A partir de esto y del crecimiento de internet, las estrategias de AQM han tenido que evolucionar y dar solución rápida a este problema debido a la cantidad de flujos diferentes en las redes, principalmente el crecimiento en el uso de protocolos de transporte no orientados a la conexión como por ejemplo el UDP.

La gran diferencia entre UDP y TCP se basa en el hecho de que el primero no posee mecanismos de control de congestión mientras que el segundo si, aportándole a éste la facilidad de acomodar sus tasas de transmisión apoyado por los parámetros establecidos en el campo de ventana en su encabezado. Diferente pasa con UDP que al no poseer mecanismos como ese, la tasa de transmisión dependerá de qué tanta información se necesita transmitir, ya que en un escenario donde ambos (*TCP y UDP*) comparten camino, el protocolo TCP será el más castigado debido a que reduciría su tasa de transmisión y el UDP obtendrá la mayor cantidad de ancho de banda.

De acuerdo con [5], para proporcionar equidad con una estrategia de AQM es necesario que esta posea la capacidad de usar información pre-flujo y que sea combinada con un esquema de programación. Incluso se encontró que las estrategias de AQM basadas en tasa (rate-based) ofrecen más equidad y garantías para QoS en comparación con estrategias de cola equitativa (*fair-Queueing*) que ofrecen colas largas y las basadas en colas (*queue-based*) que ofrecen colas cortas [50].

Con respecto a la equidad en la asignación del ancho de banda se hace referencia a la existencia básicamente de 3 tipos: (1) AQM sin información preflujo, (2) AQM con información preflujo y (3) AQM con programación preflujo [46]. El último ofrece mayor nivel de equidad

pero resulta ser más complejo, mientras que el segundo es un tema aún por lograr.

### 2.3.8. QoS y AQM

El crecimiento de internet se ha presentado entre otras cosas por el crecimiento en la aparición de nuevas aplicaciones que requieren de las características que ofrece QoS para lograr un funcionamiento óptimo; un ejemplo de ello son las aplicaciones de VoIP y transmisión de video en tiempo real que son poco tolerantes a los errores y exigen valores muy pequeños de retardo. Esto hace que internet requiera estrategias de QoS que garanticen los parámetros mínimos de funcionamiento óptimo de las aplicaciones para lo cual los investigadores han encontrado que aplicando una arquitectura de Servicios Diferenciados (DiffServ) apoyado por una estrategia de AQM ofrece buenos resultados en cuanto a provisionamiento y aplicación de QoS [5].

Asimismo, han sido muchas las estrategias de AQM propuestas para diferentes propósitos. En la Tabla 2-6 se resumen aquellas que están enfocadas específicamente a ofrecer QoS con servicios diferenciados. Las estrategias referencias tienen como característica la priorización de tráfico de acuerdo con un criterio de importancia, procurando dar mejores características al tráfico más prioritario. Igualmente, la mayoría de ellas usa la longitud de cola promedio como indicador de congestión, el cual se utiliza para obtener menores valores de retardo, encontrando también estrategias que combinan la longitud de cola promedio y la estimación de la tasa de llegada como indicador de congestión, con el objetivo de ofrecer estabilidad tal como se menciona en el marco teórico.

AQM	Indicador de Congestión	Función de Control	Características Especiales
RIO [18]	Longitud de cola promedio	Maneja dos instancias paralelas, una que marca los paquetes como "in" y otra que marca los paquetes como "out" de acuerdo a los SLA's definidos para la red. Cada instancia tiene definida los valores mínimos y máximos de la cola al igual que Pmax, y además para los "in" se considera el parámetro de ocupación promedio de la cola que es actualizado por cada paquete que llega a la cola.	Los paquetes marcados como "out" son rechazados más rápidamente que los que están marcados como "in".

AQM	Indicador de Congestión	Función de Control	Características Especiales
RIO-C [26]	Longitud de cola promedio	Es una extensión de RIO que permite trabajar con más de 2 prioridades. Cada prioridad tiene los parámetros específicos de RIO. La longitud promedio para un parámetro $j$ está dado por la ocupación de todos los paquetes marcados con esa prioridad $j$ y además de todos los paquetes de prioridad superior, de esta forma, para la prioridad menor el promedio está dado por todos los paquetes que llegan a la cola.	
RIO-DC [57]	Longitud de cola promedio	La longitud promedio de la prioridad $j$ en esta estrategia está dada solo por los paquetes que están marcados por la prioridad $j$ . La cantidad de parámetros a configurar está dado por la cantidad de prioridades existentes porque a cada prioridad se deben configurar sus propios parámetros de acuerdo a RIO.	
A-RIO [48]	Longitud de cola promedio	Es basado en RED adaptativo (ARED) donde la diferencia radica en permitir más de 2 prioridades diferentes. A-RIO intenta mantener la longitud de cola promedio dentro de un rango y la gran ventaja que muestra es que adapta los parámetros de cada prioridad de forma automática	La ocupación promedio es calculada para cada tipo de prioridad de forma individual y es actualizada por cada paquete que llega de esa prioridad o cada 0.5 segundos.
rb-RIO [17]	Tasa de llegada estimada	Soporta 3 clases de prioridad donde cada clase tiene una tasa de llegada promedio. Si la suma de las tasas estimadas de llegada es menor a la tasa promedio de la clase más baja, todos los paquetes son aceptados, de lo contrario, los paquetes de la clase más baja son rechazados de acuerdo a una probabilidad. Se utiliza esta misma lógica para cada clase.	

AQM	Indicador de Congestión	Función de Control	Características Especiales
rb-n-RED [22]	Tasa de llegada y longitud de cola promedio	Utiliza un criterio similar a rb-RIO para aceptar o rechazar los paquetes, la diferencia está en que rb-nRED calcula la tasa de llegada de acuerdo a una tasa de servicio y a un factor de corrección que depende del tamaño de la cola.	Dentro de sus parámetros incluye el tamaño máximo de paquetes permitido y la actualización de la tasa de llegada se da teniendo en cuenta la diferencia de llegada entre los paquetes para cada clase.
D-CBT [19]	Tasa de llegada y longitud de cola promedio	Tiene 3 clases de tráfico basado en el tipo de protocolo de transporte, donde existen 2 clases para el tráfico UDP (Flujo UDP y flujo multimedia) y una clase para el tráfico TCP. La idea es proteger el tráfico TCP sobre el tráfico UDP. La cola es controlada por RED y se configura de tal manera que el tráfico UDP debe respetar el umbral de la cola mientras que el tráfico TCP no es sometido a este umbral.	Es necesario tener definidos cuáles son los flujos que estarán activos y mantenerlos de forma estática.

**Tabla 2-6:** Estrategias de AQM basadas en RED

# 3 Elección de la estrategia de gestión de encolamiento y escenario de simulación

## 3.1. Escenario de simulación

El escenario sobre el cual es desarrollada esta propuesta corresponde a una aplicación de telemedicina conformada por un sistema de monitoreo remoto de signos vitales diseñado para pacientes con patologías cardíacas, que capta la información gracias a la red de sensores que está adherida al cuerpo del paciente, y se transmiten vía inalámbrica a un teléfono celular que hace las veces de nodo central de esta red. Este último se encarga de procesar y transmitir la información a un servidor remoto donde los médicos revisan y analizan la información. La estrategia a evaluar está implementada en el teléfono celular buscando ofrecer QoS a la transmisión de las señales a través de internet. En la Figura 3-1 se puede observar el escenario descrito.

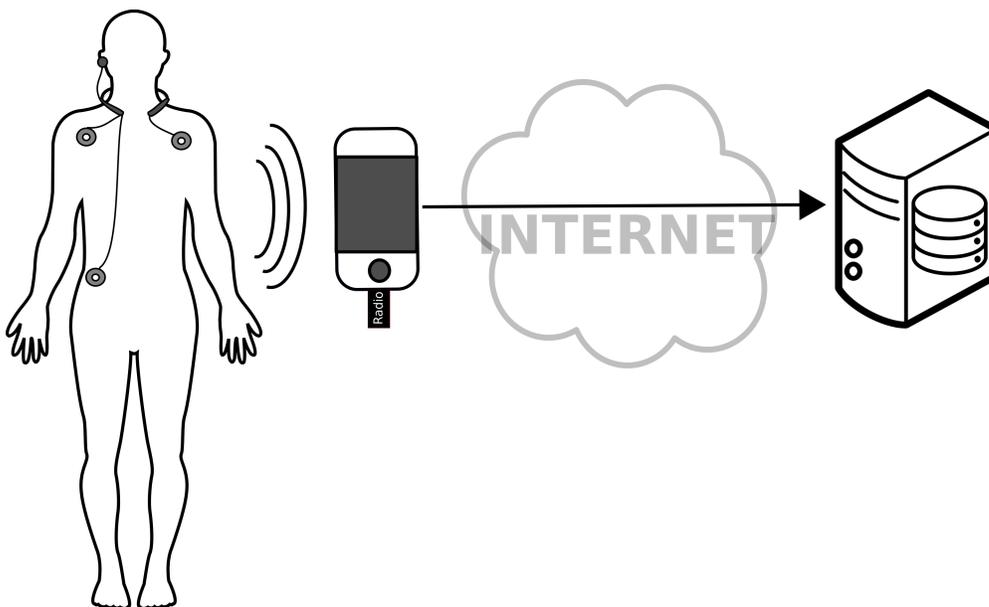


Figura 3-1: Escenario de evaluación

La estrategia de AQM se utiliza para administrar la recepción de la información transmitida por la red de sensores y el posterior reenvío de esta información al servidor remoto de tal forma que se obtenga un retardo y una cantidad de paquetes perdidos aceptables, ofreciendo de esta forma QoS al tráfico de telemedicina.

Las características de las señales obtenidas en este escenario son las siguientes:

- Tipos de datos: El sistema transmite datos de temperatura, ritmo cardíaco, nivel de saturación de oxígeno en la sangre ( $SpO_2$ ) y señales de electrocardiograma (ECG).
- Tamaño de los paquetes: Temperatura 1 byte, Ritmo Cardíaco 2 bytes,  $SpO_2$  2 bytes, ECG 75 bytes.
- Tamaño de trama recibida: Los paquetes son encapsulados en tramas de 16 bytes razón del protocolo de comunicación utilizado.
- Tasa de arribo: 250 kbps.
- Tamaño de la cola: 128 bytes (Buffer de la interfaz RS232 que controla la comunicación inalámbrica)
- Orden de Prioridad: ECG,  $SpO_2$ , Ritmo Cardíaco, Temperatura.
- Tasa de servicio máxima: 200 kbps.

De acuerdo con los parámetros de QoS para este tipo de señales, se pueden clasificar en 3 grupos según sus características similares en cuanto a retardo máximo tolerado y tasa de pérdida de paquetes. De esta forma los grupos, que representan las prioridades de tratamiento de la señal, quedan como se muestra en la Tabla **3-1**:

**Tabla 3-1:** Señales de cada prioridad

Grupo	Señal
Prioridad 1	Electrocardiograma (ECG)
Prioridad 2	Nivel de saturación de oxígeno en la sangre ( $SpO_2$ )
Prioridad 3	Ritmo Cardíaco Temperatura

Para evaluar la propuesta y obtener los resultados de los parámetros de QoS en el escenario planteado, fue necesario utilizar un entorno de simulación, debido a que la red de sensores no estaba lista para la implementación de la estrategia propuesta. Sin embargo, las condiciones del escenario planteado en esta simulación cumplen fielmente las condiciones del escenario

real.

El entorno de simulación está compuesto por un módulo generador de eventos discretos, el cual se encarga de simular la llegada de los diferentes paquetes al teléfono celular. La herramienta utilizada como simulador de eventos discretos se llama Simpy [3], y está diseñada utilizando el lenguaje de programación de alto nivel Python, por tal razón, todo el escenario fue desarrollado utilizando ese mismo lenguaje de programación.

Las entradas del escenario de simulación son paquetes con datos de las diferentes señales médicas objeto de estudio: ECG, SpO<sub>2</sub>, temperatura y ritmo cardiaco, generadas por el simulador de eventos discretos. Con estas señales, se evaluará el comportamiento de la cola ante la presencia aleatoria de ráfagas de datos y ante diferentes relaciones entre la tasa de llegada y la tasa de servicio. Las condiciones específicas de la simulación y los resultados obtenidos se abordan de forma detallada en la sección 3.3.3 y en el capítulo 4.

Para la transmisión de tráfico de telemedicina, es necesario satisfacer algunos requerimientos de QoS propios de la información. La definición de la estrategia de QoS parte de la naturaleza de la información, la cual se puede caracterizar, según [6], por los siguientes aspectos:

- Los patrones de datos generados por los diferentes tipos de señales médicas (ej: presión, temperatura, electrocardiograma, etc) pueden ubicarse en alguna de las siguientes categorías: Uniformes, variables y de corta duración.
- Existen señales que adquieren una mayor importancia que otras dependiendo de la enfermedad del paciente, por ejemplo, el ritmo cardíaco en un paciente que sufre hipertensión. Por lo tanto este tipo de señales requieren prioridad en el tratamiento.
- Desde el punto de vista de la transmisión, se debe tener en cuenta si el tráfico es de tipo periódico, de emergencia o por demanda.
- La cantidad de información a transmitir es variable y depende del estado de salud del paciente, esto hace posible que se pueda presentar en ráfagas.

Teniendo en cuenta esta clasificación, es necesario utilizar una estrategia que permita distinguir o diferenciar el tráfico en mínimo 3 clases diferentes, y que permita priorizar entre esas clases. De acuerdo con la Tabla 6, las estrategias que se podrían utilizar para el escenario descrito son:

- RIO Acoplado (RIO-C)
- RIO basado en tasa (rb-nRIO)
- RED basado en tasa (rb-nRED)

- Umbral dinámico basado en clase (D-CBT)

Sin embargo, existen tres aspectos específicos que llevan a elegir rb-nRED como la estrategia a evaluar dentro del escenario planteado. Estos aspectos son:

- La *Internet Engineering Task Force (IETF)* ha recomendado RED para el control de congestión en internet [13]
- RED tiene la capacidad de monitorear la ocupación de la cola y aumentar el rendimiento, a la vez que permiten ráfagas transitorias de datos basándose en la ocupación media de la cola; además de proveer diferentes tratamientos a la información de acuerdo a prioridades [15].
- rb-nRED mostró mejores resultados desde el punto de vista de QoS ya que se obtuvo menores valores de retraso ante altas ocupaciones de cola en comparación con otros algoritmos similares [44].

## 3.2. AQM basada en RED

n-RED es un mecanismo que consiste en n mecanismos separados, por ejemplo uno para cada color haciendo uso de la misma cola pero usando diferentes umbrales y estimaciones para rechazar un paquete que llega. n-RED es una extensión de RED y mantiene todas sus características, pero adicionalmente tiene la capacidad de discriminar algunos paquetes con respecto de otros en base a una marca. Cuando se usa con dos procedimientos de rechazo es también conocido como RIO [67].

Para cada procedimiento de rechazo, se necesitan configurar cuatro parámetros importantes:

- Tamaño de la cola.
- Umbral mínimo.
- Umbral máximo.
- Máxima probabilidad de rechazo.

En la Figura 3-2 se puede observar como es el funcionamiento de las decisiones de rechazo de RED como control de congestión.

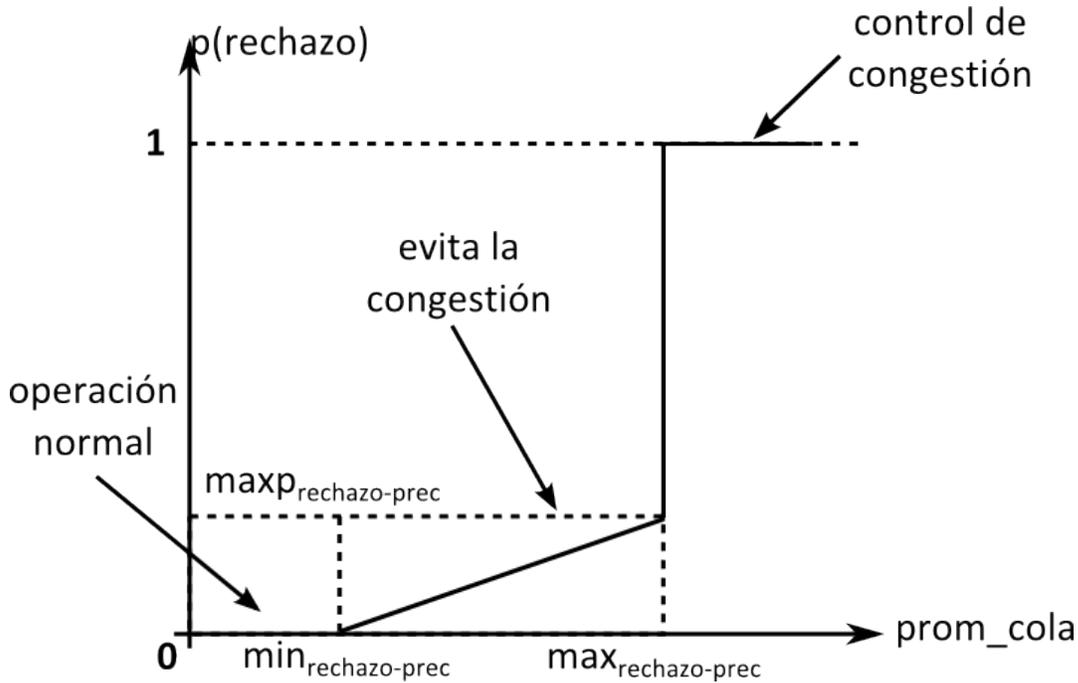


Figura 3-2: Control de congestión RED

### 3.2.1. rb n-RED

Todas las ecuaciones y gráficos mostrados en esta sección fueron tomados de [22], en el cuál se propone y detalla el funcionamiento de esta estrategia.

Al igual que n-RED, todos los paquetes deben estar marcados o coloreados. La idea es que cada marca o color tiene una tasa de arribo diferente  $EAR(c,t)$ , donde la suma de las tasas  $TEAR(t)$ , dada por la ecuación 3-1, no debe ser mayor a la tasa total de arribo que soporta la cola  $R$ . Si la tasa de arribo es pequeña, entonces todos los paquetes son aceptados, si es muy grande se debe rechazar paquetes hasta obtener la tasa de arribo total soportada por la cola.

$$TEAR(t) = EAR(\text{verde}, t) + EAR(\text{amarillo}, t) + EAR(\text{rojo}, t) \quad (3-1)$$

Esto significa que la probabilidad de rechazo es de:

$$P_{drop} = \max \left( 0, \frac{TEAR(t) - R}{TEAR(t)} \right) \quad (3-2)$$

La ecuación 3-2 nos muestra que no se rechaza ningún paquete hasta conseguir la capacidad total de la cola; una vez se supera, la probabilidad se va haciendo más alta en la medida que

la tasa de arribo se va haciendo más alta en comparación con la tasa soportada.

Sin embargo, no se considera un margen de estabilidad de la cola, por lo cual se multiplica con un factor de corrección  $CF$  el cual aumenta la probabilidad de rechazo a medida que la cola se va llenando. El factor de corrección está dado por la ecuación 3-3.

$$CF = \frac{avgQ}{QS} AP \quad (3-3)$$

$avgQ$  hace referencia a el promedio de ocupación de la cola,  $QS$  es el tamaño de la cola y  $AP$  es un parámetro de agresividad, el cuál típicamente es 2. Un valor pequeño de  $AP$  representa poca agresividad y permite grandes ocupaciones de la cola y por consiguiente alto retardo, un valor grande hace lo contrario. Por consiguiente, la probabilidad de rechazo corregida está dada por la ecuación 3-4.

$$CP_{drop} = P_{drop} \cdot CF \quad (3-4)$$

Esto significa que la tasa de rechazo en un tiempo determinado, por ejemplo la cantidad de bits descartados por segundo en un tiempo específico está dado por la ecuación 3-5:

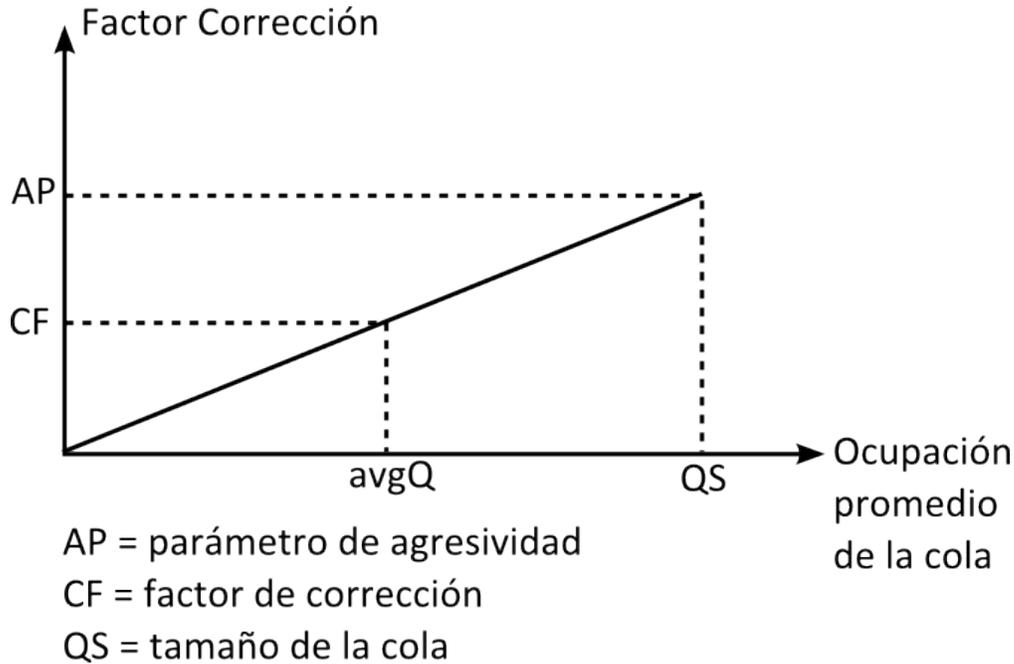
$$drop_{rate}(t) = CP_{drop} \cdot TEAR(t) \quad (3-5)$$

La cantidad límite de Tráfico Aceptado ( $AT$ ) en la cola está dada por 3-6. Este valor se convierte en el límite máximo de aceptación y es la base para la decisión de aceptación de cada categoría.

$$AT(t) = (1 - CP_{drop}) \cdot TEAR(t) \quad (3-6)$$

Los parámetros que deben ser configurados por el operador de la red se listan a continuación y se muestran en la Figura **3-3**:

- La tasa de servicio  $R$ .
- Tamaño de la cola  $QS$ .
- Parámetro de agresividad  $AP$ .



**Figura 3-3:** Factor de corrección rb n-RED

El parámetro  $AP$  solo debe ser configurado cuando se utiliza el factor de corrección  $CF$ , los parámetros de  $R$  y  $QS$  son valores típicos del uso de colas.

### 3.2.1.1. Estimación de Tasa De Arribo

Es necesario calcular la tasa de arribo para cada tipo de información que se quiere administrar, por esto existe la ecuación 3-7 que además se actualiza con cada paquete recibido.

$$EAR_{new}^{arr}(c, t) = \left(1 - e^{-\frac{T}{K}}\right) \cdot \frac{L}{T} + e^{-\frac{T}{K}} \cdot EAR_{old}^{arr}(c, t) \quad (3-7)$$

Donde:

- $C$  es el color o marca del tipo de información.
- $K$  es una constante cuyo valor típico es 0, 0.5 o 1 segundo.
- $L$  el tamaño del paquete.
- $T$  el tiempo transcurrido entre el actual paquete y la última actualización de  $EAR$  realizada.

Con respecto a  $K$ , valores pequeños significan una actualización más rápida y valores grandes significa que la actualización es más lenta lo que redundaría en una reacción más lenta ante la presencia de ráfagas.

Esta tasa de arribo se actualiza cada que llega un paquete del color correspondiente a esta tasa (si llegan paquetes de otros colores simplemente la tasa permanece constante). Para solucionar este inconveniente, la ecuación 3-8 se utiliza para calcular un límite superior de esa tasa que se actualiza ante la llegada de cualquier tipo de paquete

$$EAR^{upper}(c, t) = \left(1 - e^{-\frac{T}{K}}\right) \cdot \frac{L_{max}}{T} + e^{-\frac{T}{K}} \cdot EAR^{arr}(c, t) \quad (3-8)$$

Donde  $T$  juega el mismo papel que en la ecuación anterior, es decir, se toma el tiempo hasta la última actualización de la tasa de arribo y no de la tasa del límite superior. La tasa final de arribo estimada es actualizada por cada paquete que llega independiente del color de acuerdo a la ecuación 3-9.

$$EAR(c, t) = \min(EAR^{arr}(c, t), EAR^{upper}(c, t)) \quad (3-9)$$

La tasa de servicio  $R$  no siempre es constante y depende de las colas de QoS que se tengan, por ejemplo si hay una cola para tráfico del mejor esfuerzo y colas de envío urgente al mismo tiempo, lo que hace que la tasa de servicio sea dependiente del tiempo y sea necesario calcularla para cada tiempo  $t$  de una forma similar como se calcula la tasa de arribo. La ecuación 3-10 se utiliza para este propósito.

$$R(t) = \left(1 - e^{-\frac{T}{K}}\right) \cdot \frac{L}{T} + e^{-\frac{T}{K}} \cdot R(t_{previo}) \quad (3-10)$$

Donde  $t$  es el tiempo del último servicio de un paquete, y  $t_{previo}$  es el tiempo de servicio anterior.  $T$  es la diferencia entre  $t$  y  $t_{previo}$ .

### 3.2.1.2. Probabilidad de rechazo de cada color

$AT(t)$  es la referencia de aceptación de tráfico para Rate-Based n-RED, es decir que todo el tráfico que supere esta referencia será rechazado inmediatamente independiente de cualquier otra condición. La cantidad de tráfico recibido en la cola está dado por  $TEAR(t)$ , la cual es la suma de las tasas de llegada de cada color; si este valor es menor a  $AT(t)$  no se rechaza ningún paquete, pero si el valor el mayor, es necesario considerar los siguientes escenarios:

- $TEAR(t)$  es mayor pero la suma de  $EAR(verde, t) + EAR(amarillo, t)$  es menor:  
En este caso se aceptan todos los paquetes verdes y los paquetes amarillos. Los paquetes

rojos serán aceptados probabilísticamente de acuerdo con la probabilidad de rechazo dada por la ecuación 3-11, cuyo comportamiento se muestra en la Figura 3-4.

$$P_{rojo} = \frac{TEAR(t) - AT(t)}{EAR(rojo, t)} \quad (3-11)$$

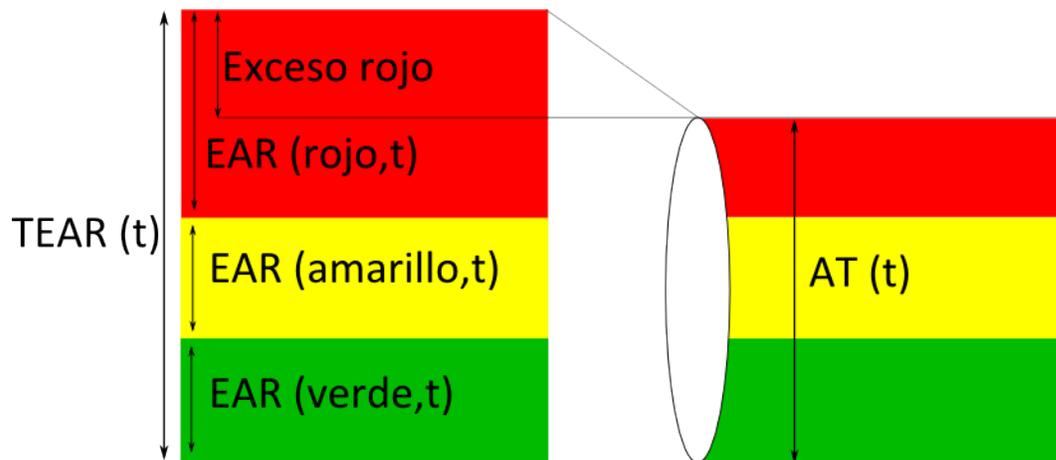


Figura 3-4: Paquetes rojos rechazados probabilísticamente

- La suma de  $EAR(verde, t) + EAR(amarillo, t)$  es mayor pero  $EAR(verde, t)$  es menor: Todos los paquetes verdes son aceptados, los paquetes rojos son rechazados y los paquetes amarillos son aceptados probabilísticamente de acuerdo con la probabilidad de rechazo dada por la ecuación 3-12, cuyo comportamiento se muestra en la Figura 3-5.

$$P_{amarillo} = \frac{EAR(verde, t) + EAR(amarillo, t) - AT(t)}{EAR(amarillo, t)} \quad (3-12)$$

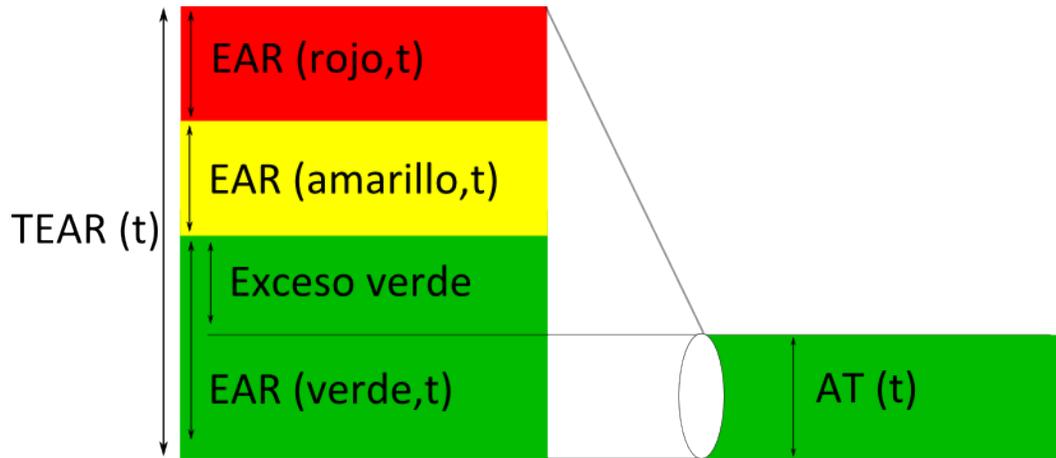


Figura 3-6: Paquetes verdes rechazados probabilísticamente

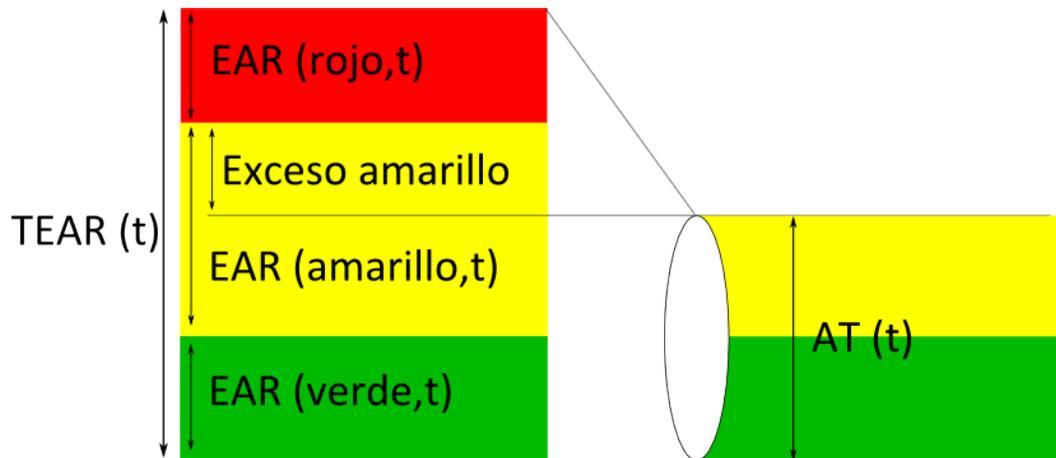


Figura 3-5: Paquetes amarillos rechazados probabilísticamente

- El valor  $EAR(verde, t)$  es mayor:  
 Los paquetes amarillos y los paquetes rojos son rechazados. Los paquetes verdes son aceptados probabilísticamente de acuerdo con la probabilidad de rechazo dada por la ecuación 3-13, cuyo comportamiento se muestra en la Figura 3-6.

$$P_{verde} = \frac{EAR(verde, t) - AT(t)}{EAR(verde, t)} \quad (3-13)$$

## 3.2.2. Análisis de aportes y falencias de rb-nRED

### 3.2.2.1. Características

rb n-RED es una estrategia de AQM que tiene la capacidad de diferenciar el tráfico de acuerdo con una característica o marca, buscando diferenciarlo para darle un tratamiento especial, por ejemplo el color con el que fue categorizado, para luego tomar la decisión de si es aceptado o no en la cola. Esta decisión se apoya igualmente en la tasa de llegada media a largo plazo del tráfico de cada color y la ocupación promedio de la cola, de tal forma que la decisión sea tomada con más justicia con respecto al propósito general de la diferenciación o marca.

Esta estrategia se aplicará en el escenario de telemedicina descrito para evaluar sus características y conocer su comportamiento ante la naturaleza de la información descrita anteriormente. Lo primero será realizar un análisis matemático de las ecuaciones que definen los diferentes parámetros que inciden en el comportamiento de la AQM. El segundo paso será simular el escenario para conocer el comportamiento ante situaciones de alto *stress*.

### 3.2.2.2. Análisis matemático

- EAR: Tasa estimada de arribo

$$EAR_{new}^{arr}(c, t) = \left(1 - e^{\frac{-T}{K}}\right) \cdot \frac{L}{T} + e^{\frac{-T}{K}} \cdot EAR_{old}^{arr}(c, t)$$

Es inversamente proporcional al tiempo  $T$  que representa la diferencia entre la llegada de paquetes del mismo color a la cola, situación que da como resultado valores de EAR muy grandes a valores de  $T$  muy pequeños. La ecuación incluye una exponencial negativa, la cual tiende a 1 para valores pequeños del exponente, si el valor de  $T$  es pequeño entonces esta exponencial será casi igual a 1 que al restar a la unidad, aporta valores cercanos a 0 al resultado total de  $EAR$ . El segundo componente de la suma tiene el mismo comportamiento de la exponencial negativa, obteniendo como resultado el mismo valor de EAR cada vez que se calcule.

En conclusión, en momentos en que lleguen rápidamente paquetes del mismo color, la  $EAR$  no tendrá cambios significativos y, teniendo en cuenta que la probabilidad de rechazo basa su decisión en este valor, se podría determinar que en momentos donde se presentan ráfagas de datos, la probabilidad de rechazo no actuaría correctamente, permitiendo grandes ocupaciones de la cola o en el peor de los casos, perdiendo el control de la ocupación de la cola.

- R: Tasa Variable de Servicio

$$R(t) = \left(1 - e^{-\frac{T}{K}}\right) \cdot \frac{L}{T} + e^{-\frac{T}{K}} \cdot R(t_{previo})$$

El cálculo de esta tasa utiliza la misma ecuación que la *EAR* con dos diferencias: una es que el tiempo  $T$  es la diferencia del tiempo entre dos paquetes servidos indiferente del color, la otra es que no utiliza el *EAR* anterior sino la  $R$  anterior. Para cada cálculo de la tasa  $R$  se obtiene un valor diferente debido a que el tiempo de servicio cambia para cada paquete servido.

La variabilidad de la tasa de servicio está basada en el valor  $T$ , de tal forma que si este valor es pequeño, la tasa se mantendrá en el máximo valor posible, pero si el valor de  $T$  aumenta la tasa disminuirá. Este comportamiento resulta ser el esperado en comparación con el caso de la *EAR*, pues permite concluir que si la ocupación de la cola es alta, o se presentan ráfagas en el servicio, la tasa será alta; pero si los paquetes llegan más lentamente esta tasa de servicio será más lenta.

- CP: Probabilidad de rechazo corregida

$$CP_{drop} = P_{drop} \cdot CF$$

$$droprate(t) = CP_{drop} \cdot TEAR(t)$$

$CP$  es directamente proporcional al Factor de Corrección  $CF$  y la probabilidad de rechazo. A su vez, la probabilidad de rechazo viene dada por la diferencia entre la suma (*TEAR*) y la tasa de servicio. La probabilidad corregida es supremamente importante para la toma de la decisión de aceptar o no el paquete en la cola, ya que si ésta es cero, el condicional para la aceptación del paquete en la cola siempre se cumplirá.  $CP$  puede tomar el valor de cero si la tasa de servicio es igual o mayor que la suma de las tasas de arriba, lo que significa que la cola no corre el riesgo que presentar congestión, situación por la cual sería necesario el control de aceptación de los paquetes desapareciendo la característica de diferenciación y priorización, es decir, la aceptación de todo tipo de paquetes en todo momento.

- $CF$ : Factor de Corrección

$$CF = \frac{avgQ}{QS} AP$$

Es directamente proporcional al porcentaje de ocupación promedio de la cola, es decir, cuando la cola permanece muy llena por mucho tiempo, el  $CF$  es mayor, provocando que la probabilidad de rechazo corregida sea mayor. El valor máximo que puede tomar  $CF$  es igual al valor dado a la constante  $AP$ , y teniendo en cuenta que el valor de  $CP$  es la multiplicación de  $CF$  por la probabilidad de rechazo, se puede llegar a obtener una probabilidad de rechazo mayor que 1.

Si el valor de  $CP$  es mayor que 1, el valor de  $AT$  toma valores negativos, si este valor es negativo, significa que rechaza todo los paquetes que llegan, lo cual es coherente con el comportamiento que se espera de la estrategia, ya que si  $CP$  es mayor que 1, quiere decir que la cola está totalmente llena.

En síntesis, rb n-RED ofrece varias características interesantes para garantizar QoS, pero también presenta varios inconvenientes que no son favorables para un escenario de transmisión de información de telemedicina. Esos inconvenientes se resumen a continuación:

- El valor de  $EAR$  tiende a ser poco variante en la medida que la diferencia de los tiempos de llegada de los paquetes se hace más pequeña. Es decir, no ofrece una buena respuesta ante la presencia de ráfagas.
- La probabilidad de rechazo depende de la suma de las  $EAR$ . Al ser  $EAR$  poco reactiva ante la presencia de ráfagas, la probabilidad de rechazo no actúa correctamente para controlar la congestión en ese momento.
- Un valor típico de  $AP$  es 2, lo que indica que  $CF$  puede tomar valores cercanos a 2 cuando la cola está muy ocupada. Cuando  $CF$  toma valores cercanos a 2, el valor de  $AT$  puede ser negativo eliminando el control de aceptación por categoría de la estrategia.

De acuerdo con lo anterior, se puede concluir que la estrategia rb n-RED tiende a ser inestable ante la presencia de ráfagas, que es una de las características que tiene el tráfico de telemedicina. Además, no ofrece mucho control ante ocupaciones altas de la cola. Por estas razones, no es una estrategia apropiada para aplicarla a un escenario de telemedicina, pero sirve de fundamentación para generar una nueva propuesta que supla estos inconvenientes.

### 3.2.3. Resultados de simulación

Para evaluar el comportamiento de rb-nRED en el escenario de telemedicina descrito en la sección 3.1, se realizó un experimento factorial  $5^2$  de 125 observaciones, y se establecieron los valores particulares de rb-nRED tal como se indica a continuación:

#### Parámetros generales de la simulación

- Parámetro de agresividad  $AP = 2$
- $K = 1$

**Tasa de servicio variable** Se evaluó el comportamiento de la tasa de servicio con respecto a la variabilidad de la diferencia en el tiempo de llegada de cada paquete.

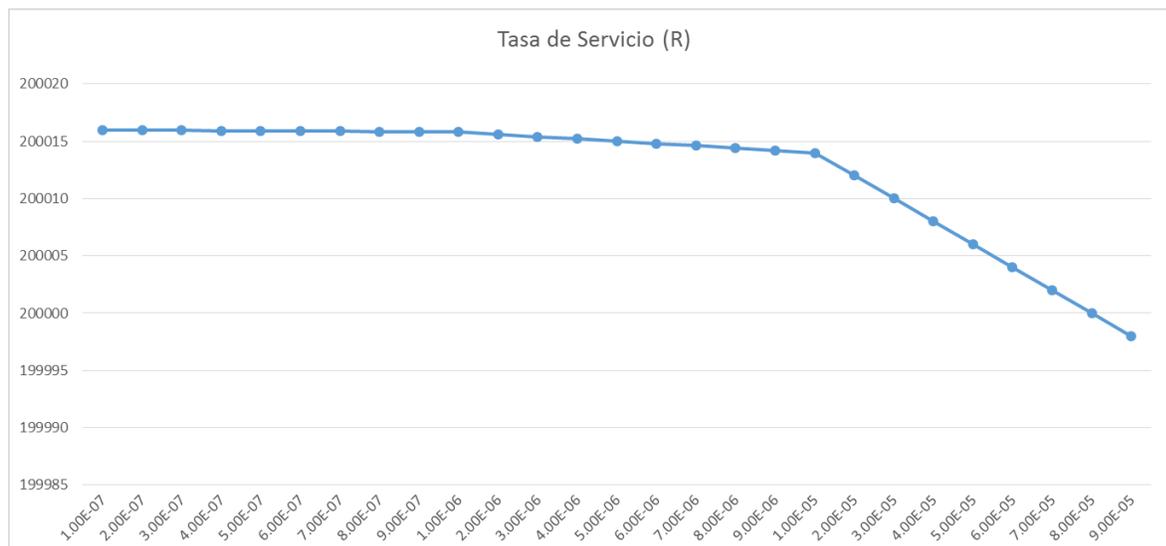
Se atendieron un total de 155075 paquetes, y se obtuvieron los siguientes tiempos de servicio:

- Tiempo de servicio promedio:  $83\mu s$
- Tiempo de servicio máximo: 1.35ms
- Tiempo de servicio mínimo: 2.28ns

Y las siguientes tasas de servicio:

- Tasa de servicio promedio: 22989 bit/seg
- Tasa de servicio máxima: 200024 bit/seg
- Tasa de servicio mínima: 19578 bit/seg

Algo particular que se puede observar con estos resultados es el valor máximo que tomó la tasa de servicio variable. Ese valor máximo es más alto que la tasa de servicio configurada inicialmente, situación que llama la atención ya que, no es normal para una estrategia que permita intentar transmitir a una tasa mayor a la que soporta el enlace. Esta situación nos llevó a profundizar en el resultado, para eso se tomó una porción del tiempo de servicio obtenido y se graficó una curva que muestra el comportamiento de la tasa de servicio ante el cambio del tiempo. En la Figura 3-7 se puede observar el comportamiento de la tasa de servicio cuando el tiempo  $T$  está entre  $1e - 7s$  y  $9e - 5s$  para conocer el valor límite del tiempo  $T$  para una tasa de servicio inicial de 200Kbps.



**Figura 3-7:** Resultado tasa de servicio fija rb n-RED

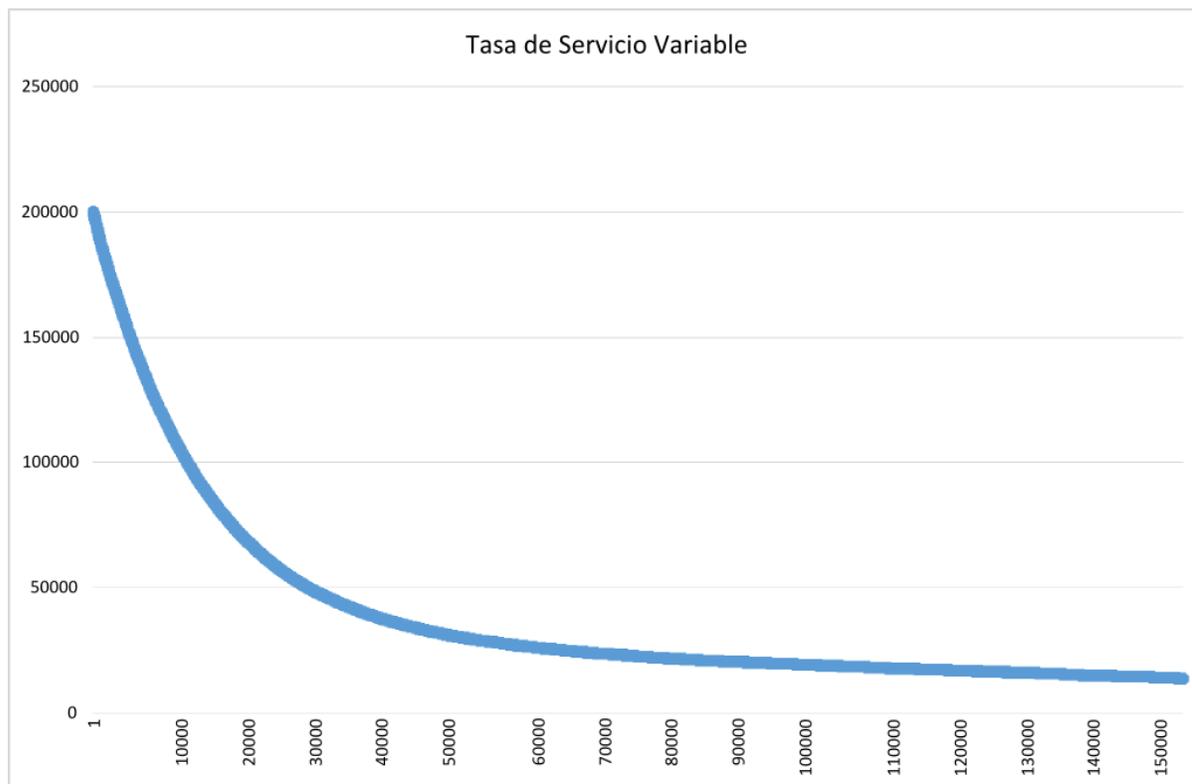
La Figura 3-7 muestra que cuando el tiempo  $T$  es menor a  $9e - 5s$ , la tasa de servicio calculada tiende a ser mayor a la tasa de servicio inicial, es decir, a menor retardo se requiere una mayor tasa de servicio. Es importante tener en cuenta los límites para la simulación ya que si la tasa de servicio inicial es la tasa máxima del sistema, es necesario agregar algún parámetro que controle el desborde de esta tasa de servicio para la cola.

Otra situación que resulta llamativa es el nivel hasta el que disminuye tasa de servicio, en la Figura 3-8 se puede apreciar que la tendencia es descendente en todo momento, dejando la inquietud sobre el control ante la presencia de ráfagas, ya que en ese momento el valor  $T$  sería menor y por tanto la tasa debería subir.

### 3.3. Estrategia de AQM propuesta para QoS en tráfico de telemedicina

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis del comportamiento de rb-nRED, los aspectos donde esta estrategia no ofrece buenas condiciones de funcionamiento para el escenario planteado son: la relación entre la tasa de llegada y la tasa de salida, la presencia de ráfagas y la alta ocupación de la cola.

Sin embargo, características como la adaptabilidad en la probabilidad de rechazo, los límites dinámicos de aceptación para cada categoría y la posibilidad de ajustar la agresividad de la estrategia, resultan interesantes y útiles en la propuesta de una nueva estrategia que cumpla con los requerimientos que exige el tráfico de telemedicina.



**Figura 3-8:** Resultado tasa de servicio variable rb n-RED

Teniendo en cuenta estos factores, se ha diseñado una nueva estrategia, que hemos llamado qob A-RED. La idea principal de qob A-RED es asignar de forma dinámica el espacio a utilizar por cada tipo de paquete de acuerdo con la ocupación de la cola en el instante en que éste llega. Esta estrategia considera la marcación de los paquetes de acuerdo con 3 prioridades (alta, media y baja) que determinan la importancia del paquete y por ende el orden con el que serán atendidos por la cola. Además, esta marcación también se utiliza para determinar la aceptación o no del paquete cuando llegue a la cola, de acuerdo a la probabilidad de rechazo calculada para cada prioridad.

El control de aceptación de un paquete que llega a la cola está determinado por la probabilidad de rechazo y por la ocupación de la cola. Cada prioridad cuenta con un límite de aceptación en la cola, que busca controlar la ocupación por parte de paquetes de prioridades bajas y ofrecer más espacio a las prioridades altas. La probabilidad de rechazo para cada tipo de paquete se calcula a partir de la diferencia que exista entre la ocupación instantánea de la cola y el límite de aceptación para la prioridad a la que pertenece el paquete. La idea general es que la probabilidad de rechazo de cada prioridad aumente en la medida que la ocupación de la cola se acerca a cada uno de los límites, es así como en un mismo instante

de tiempo, los paquetes con menor prioridad tendrán una probabilidad de rechazo más alta que los paquetes de la segunda prioridad. Los paquetes con la prioridad más alta serán rechazados únicamente si no hay espacio en la cola, es decir, a estos paquetes no se les aplica probabilidad de rechazo en ningún momento sin importar la ocupación de la cola.

Otra de las características de qob A-RED es la prioridad en el servicio. La estrategia plantea un esquema que revisa los paquetes que se encuentran almacenados en la cola, si hay almacenado alguno que pertenezca a la prioridad más alta, éste será atendido primero que cualquier otro sin importar si existen paquetes de otras prioridades que hayan sido aceptados antes en la cola. Si no hay ninguno de la prioridad más alta, se revisa si existe alguno de la segunda prioridad, y éste se sirve primero que los de la tercera prioridad siguiendo el mismo criterio que se utiliza para los de la prioridad más alta. La idea principal es ofrecer mejores características a las prioridades más altas buscando disminuir el retardo para estos paquetes.

### 3.3.1. Probabilidad de rechazo

La probabilidad de rechazo es el factor que controla la admisión de los paquetes en la cola de acuerdo con la prioridad a la que pertenecen, excepto a los paquetes de la prioridad más alta para los cuales no se aplica ningún criterio de aceptación diferente a que no quede espacio para almacenarlo. La cola cuenta con dos marcas que identifican el límite superior ( $L_S$ ) y el límite inferior ( $L_I$ ), para señalar el espacio de la cola en el cual se aplicará la probabilidad de rechazo. El límite superior representa el 100% de rechazo para los paquetes que no son de la prioridad más alta, y el límite inferior representa el 0% de rechazo. La probabilidad de rechazo aumenta o disminuye de acuerdo con la ocupación de la cola entre estos límites, y es diferente para los paquetes de segunda prioridad y tercera prioridad en el mismo instante de tiempo; es decir, en un instante  $t$ , la probabilidad de rechazo para los paquetes de la tercera prioridad será mayor que para los paquetes de segunda prioridad, lo que permite concluir que se aceptarán más paquetes de segunda prioridad que de tercera prioridad en la cola.

El objetivo que se busca con este comportamiento es obtener la menor tasa de pérdida de paquetes ( $PLR$ ) para las prioridades más altas, garantizado de esta forma mejores características de calidad de servicio a la información que se establezca como más importante en un escenario de Telemedicina.

El límite superior y el límite inferior están dados por las ecuaciones 3-14 y 3-15.

$$L_S = P_C - K * R_T \quad (3-14)$$

$$L_I = \frac{L_S}{K + 1} \quad (3-15)$$

$P_C$  representa la cantidad de paquetes que caben en la cola, calculado a partir del tamaño de los paquetes ( $T_P$ ) y la capacidad de la cola en bits.  $K$  es una constante de reserva diferente de cero, con la cual se indica el número de paquetes de la máxima prioridad al que se desea asegurar espacio en la cola; se debe tener en cuenta que a mayor valor de  $K$ , menor espacio queda disponible para los demás paquetes, incluso para los de la misma prioridad.  $R_T$  es la relación entre la tasa de arribo y la tasa de servicio de la cola.

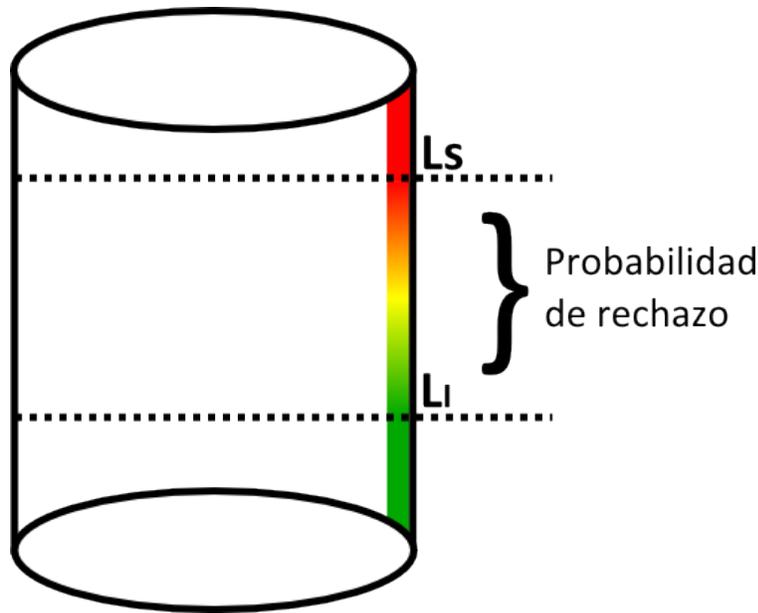
El límite superior considera  $R_T$  con el objetivo de ser más justos en el momento de reservar los espacios en la cola, es decir, aunque la idea es garantizar las mejores condiciones a los paquetes de mayor prioridad, también se busca que las otras prioridades no sean tan fuertemente penalizadas. Para este propósito,  $R_T$  controla el riesgo de reservar espacio que posiblemente no se utilice, a razón que la tasa de servicio sea mayor a la tasa de arribo. En este caso, se controlarían valores de  $K$  grandes para escenarios donde no se corre el riesgo de presentar altas ocupaciones de la cola, permitiendo optimizar el uso del espacio de la cola por parte de todas las prioridades.

El límite inferior se establece en armonía con el límite superior, buscando que éste se acerque al 0% de la cola de forma proporcional como el límite superior se aleja del 100%. El propósito del valor de  $K$  en el divisor es obtener mayor espacio para la aplicación de la probabilidad de rechazo, en la medida que se reserva menos espacio para los paquetes prioritarios. En el caso de que el valor de  $R_T$  sea pequeño y controle el valor de  $K$  para el límite superior, el espacio entre los límites sería mayor permitiendo la aceptación de más paquetes de todas la prioridades, disminuyendo de esta forma la penalización de las prioridades menores en estos escenarios.

La probabilidad de rechazo se aplica a partir del límite inferior, permitiendo que se acepten todos los paquetes que llegan a la cola mientras la ocupación está entre el 0% y el límite inferior. De esta forma, se busca atender la mayor cantidad de paquetes posible. La porción de espacio en la cola comprendido entre el límite superior y el límite inferior es la que entra en disputa por todos los paquetes que llegan a la cola y es controlada por la probabilidad de rechazo. La probabilidad de rechazo para la segunda prioridad está dada por la ecuación 3-16:

$$P_2 = \frac{\left(\frac{O_C}{T_P}\right) - L_S}{L_S - L_I} \quad (3-16)$$

$O_C$  es la ocupación instantánea de la cola. De esta forma, la probabilidad de rechazo aumenta en la medida en que el espacio libre entre el límite superior y el límite inferior disminuye llegando a un ciento por ciento de rechazo cuando la ocupación llega hasta el límite superior. Desde el límite superior en adelante sólo se aceptan paquetes cuya prioridad es la más alta. Con lo anterior se busca que la probabilidad de rechazo sea dinámica o adaptativa a la ocupación de la cola, permitiendo que se acepten más paquetes en la medida que la cola los va atendiendo y liberando espacio. La Figura 3-9 muestra los límites que plantea la estrategia y el espacio de la cola en el cual se aplica la probabilidad de rechazo.



**Figura 3-9:** Probabilidad de rechazo qob A-RED

La probabilidad de rechazo para la menor prioridad depende directamente de la probabilidad de rechazo de la segunda prioridad, la cual se multiplica por el factor de relación de rechazo  $R_P$ . Este factor es un número igual o mayor que 1, el cual indica cuantos paquetes de la menor prioridad se rechazan por cada paquete que se rechace de la segunda prioridad. Se debe tener en cuenta que entre mayor sea este número, menos espacio habrá para la aceptación de los paquetes de esta prioridad, y si se elige el menor valor entonces ambas prioridades se considerarán iguales. Al estar directamente relacionada con la probabilidad de la segunda prioridad,  $P_3$  también toma la característica de ser adaptativa a la ocupación de la cola. Esta probabilidad está dada por la ecuación 3-17.

$$P_3 = R_P * P_2, \quad 1 \leq R_P < \frac{1}{P_2} \quad (3-17)$$

### 3.3.2. Prioridad en el servicio

La estrategia de servicio se encarga de atender los paquetes almacenados en la cola de la forma más rápida posible. Su objetivo fundamental es disminuir el tiempo que tardan los paquetes desde que son aceptados en la cola hasta que son atendidos. Para dar mejores características a los paquetes con mayor prioridad, qob A-RED implementa una estrategia de servicio que es coherente con las marcas de prioridad utilizadas para la aceptación o no del paquete en la cola, reduciendo aún más el tiempo de servicio de los paquetes de acuerdo con su prioridad. En la Figura 3-10 se muestra el pseudocódigo de decisión para el servicio de los paquetes que están almacenados en la cola.

```
Decisión de servicio
si (Hay paquetes de primera prioridad en cola)
    entonces: sirve paquete de primera prioridad;

sino
si (Hay paquetes de segunda prioridad en la cola)
    entonces: sirve paquete de segunda prioridad;

sino
    entonces: sirve paquete de tercera prioridad;
```

Figura 3-10: Seudocódigo de servicio qob A-RED

### 3.3.3. Resultados de simulación

El escenario de simulación es un caso de atención de telemedicina el cual está compuesto por una red de sensores que se encarga de recolectar toda la información sobre el estado de salud del paciente, y un teléfono inteligente que cumple la tarea de procesar y transmitir la información recolectada por la red de sensores hasta un servidor central que la almacena en una base de datos. La estrategia qob A-RED está implementada en el teléfono inteligente que sirve como gateway entre la red de sensores e internet. Las características específicas del escenario son las descritas en la sección 3.1

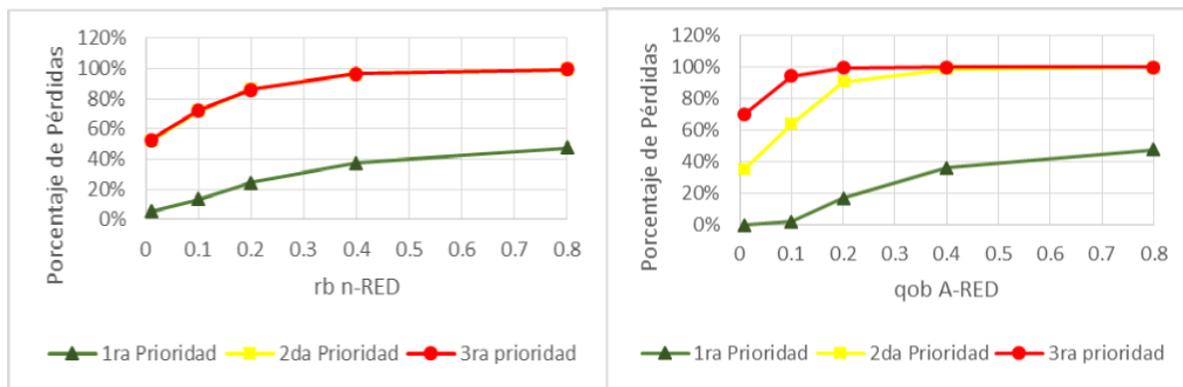
La estrategia qob A-RED se utiliza para administrar la recepción de la información transmitida por la red de sensores y el posterior reenvío de esta información al servidor remoto de tal forma que se obtenga un retardo y una cantidad de paquetes perdidos aceptables, ofreciendo de esta forma QoS al tráfico de telemedicina.

El objetivo de las pruebas realizadas es medir la respuesta de la estrategia qob A-RED en

cuanto a paquetes perdidos y retardo, y compararla con rb n-RED teniendo en cuenta dos aspectos: la presencia de ráfagas de paquetes de prioridades altas y la diferencia entre la tasa de entrada y la tasa de salida.

El tráfico se genera de manera aleatoria siguiendo una distribución exponencial ( $\lambda = \frac{T_P}{T_A}$ ). Se considera un escenario con probabilidad de ráfagas de tráfico prioritario y se analiza también el desempeño de la estrategia ante el cambio en la relación entre las tasas de llegada y de servicio, con valores de  $K = 3$  y  $R_P = 2$ .

La Figura 3-11 y la Figura 3-12 muestran la respuesta de la simulación ante la presencia de ráfagas para las dos estrategias. La Figura 3-11 presenta el comportamiento frente a la probabilidad de presencia de ráfaga, en relación con el porcentaje de paquetes perdidos. Se observa que el porcentaje de paquetes perdidos tiene una mejor respuesta en la estrategia propuesta para los paquetes de las prioridades superiores, en comparación con rb n-RED que no muestra diferenciación entre los paquetes de segunda y tercera prioridad.



**Figura 3-11:** Presencia de ráfaga - %Pérdida de Paquetes

La Figura 3-12 muestra el resultado del retardo, donde el eje de las abscisas corresponde al valor de relación entre tasas y el eje de las ordenadas corresponde al tiempo de retardo. En la figura se observa una vez más, que la estrategia qob A-RED ofrece mejor diferenciación y tratamiento a las prioridades superiores ante la presencia de congestión en la cola.

La Figura 3-13 y la Figura 3-14 muestran el resultado como función de la relación entre las tasas. En el aspecto de los paquetes perdidos que se muestra en la Figura 3-13, se muestra un mejor comportamiento de la estrategia qob A-RED debido a que ofrece mejor estabilidad para las prioridades altas, en comparación a rb n-RED que empieza a perder diferenciación después de una relación igual o mayor a 1.5 entre las tasas. En la Figura 3-14, con respecto al retardo, se observa la misma tendencia, pero esta vez los resultados son mejores para todas

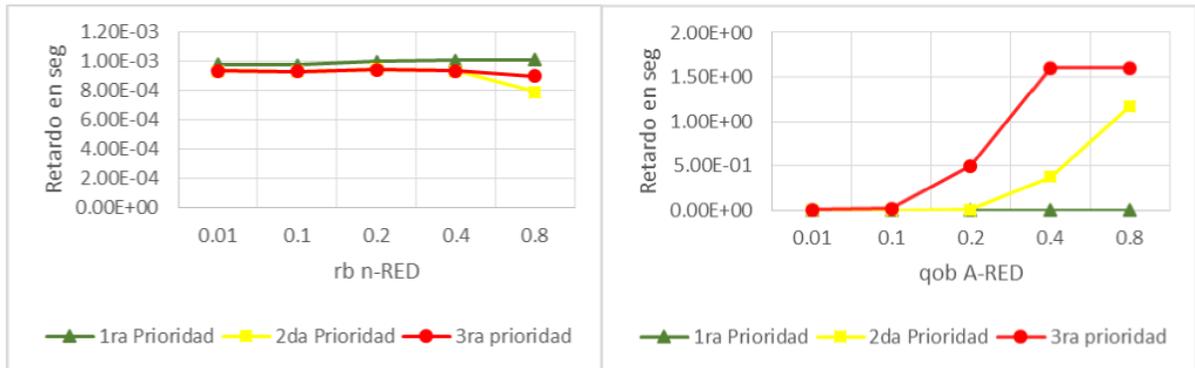


Figura 3-12: Presencia de ráfaga - Retardo

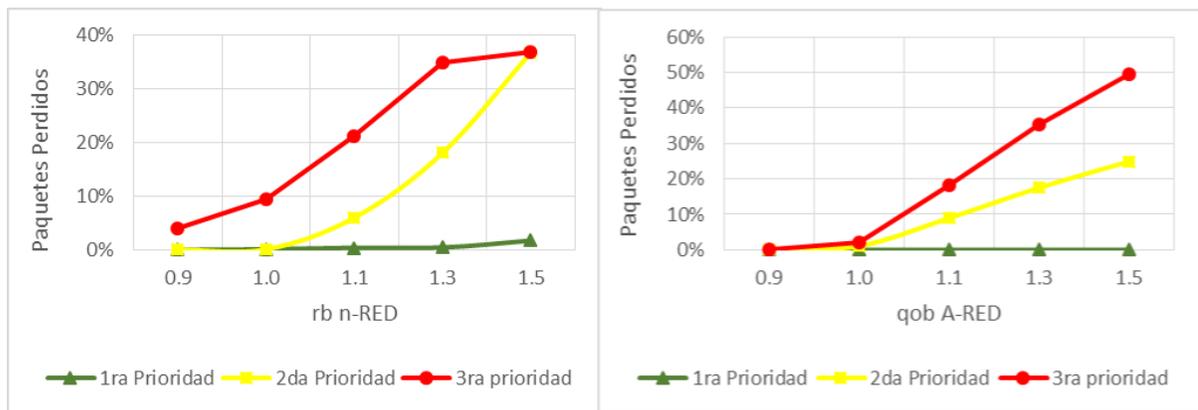


Figura 3-13: Relación entre tasas - %Pérdida de Paquetes

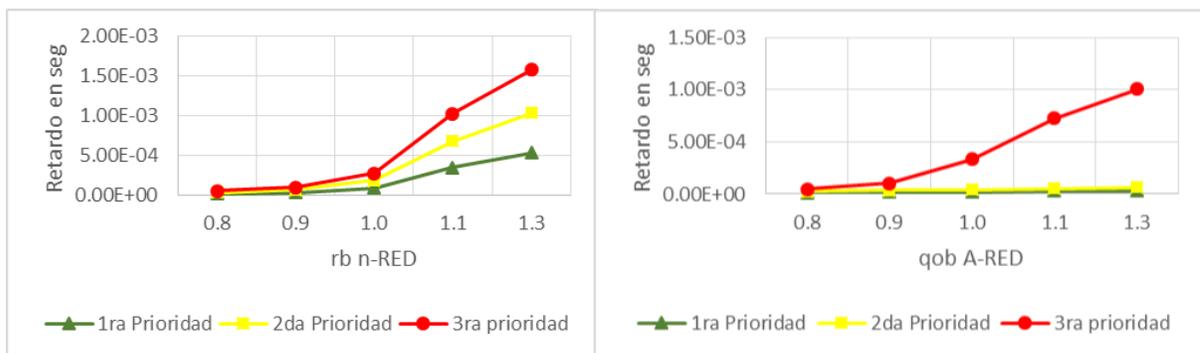


Figura 3-14: Relación entre tasas - Retardo

las prioridades.

Los resultados de las simulaciones muestran que la estrategia propuesta, a la que llamamos qob A-RED, garantiza mejores características de QoS a las prioridades altas ante la presencia de congestión en la cola, en comparación con rb n-RED, para un escenario de transmisión de

información de telemedicina. Sin embargo, esto se logra sacrificando hasta un 23 % en la tasa de paquetes perdidos y un 80 % en el retardo de la prioridad más baja, la cual representa el tráfico con más flexibilidad o menos crítico. No obstante, la información que se categoriza dentro de la prioridad más baja, se puede obtener desde la señal ECG que es categorizada como la prioridad más alta.

## 4 Planteamiento del experimento

Los resultados de la aplicación de la propuesta se analizaron mediante un diseño de experimentos que busca validar las hipótesis de cada experimento, además de mostrar cuáles son los factores que más influyen en la estrategia de acuerdo a los resultados obtenidos. Esta información es útil para realizar ajustes o correcciones a la propuesta buscando obtener los mejores resultados. Para la validación se utilizaron análisis de medias y análisis de varianzas ANOVA para encontrar la significancia de cada factor del diseño experimental con la variable respuesta.

El diseño experimental será un diseño factorial  $5^2$ , es decir, se cuenta con 2 factores controlables cada uno con 5 niveles de evaluación los cuales se explican a continuación. Para la presentación del modelo se toma como referencia la metodología recomendada por Coleman & Montgomery [20] y se explica gráficamente el modelo en la Figura 4-1.

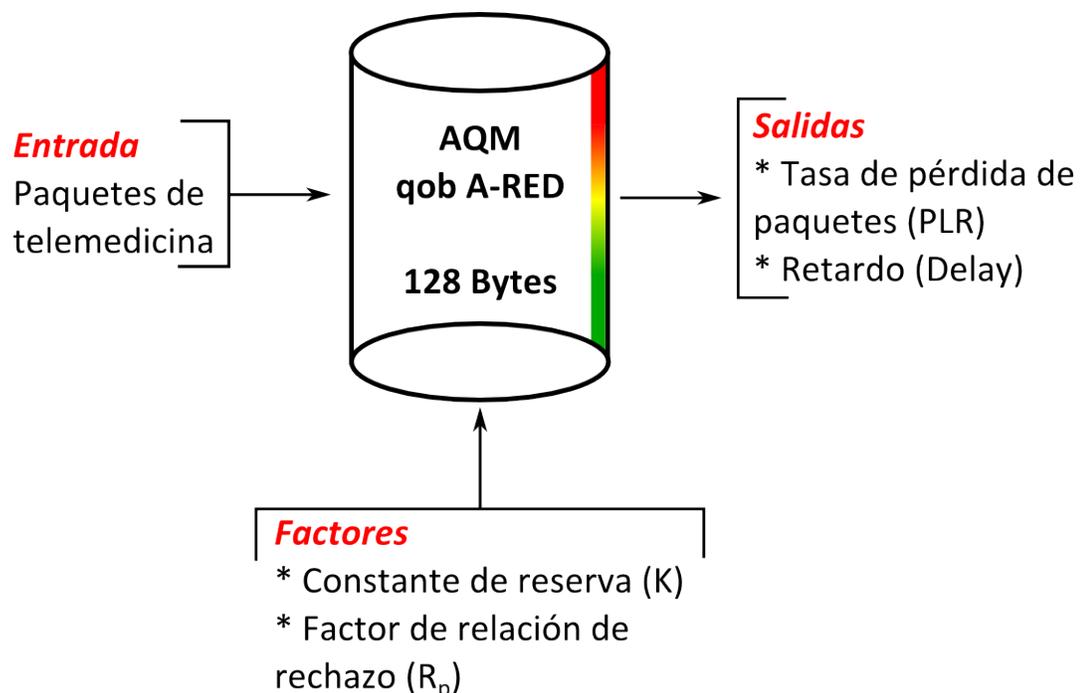


Figura 4-1: Diseño Experimental

## 4.1. Unidad experimental

La unidad experimental está dada por una cola de almacenamiento temporal de paquetes con capacidad de 128 bytes gestionada mediante la AQM qob A-RED. A la cola llegan paquetes de 16 bytes que corresponden al tamaño de la trama que soporta el protocolo de comunicación.

## 4.2. Factores controlables

- **Constante de reserva (K):** Indica el número de paquetes de la máxima prioridad al que se desea asegurar espacio en la cola.

**Niveles de operación normal:**  $1 - \infty$  paquetes.

**Precisión de la medición:**  $\pm 1$  paquete.

**Niveles propuestos:** 1, 2, 3, 4 y 5 paquetes.

**Efecto previsto sobre la variable respuesta:** Se espera que a medida que se aumente la cantidad de paquetes de reserva, se obtengan mayores valores en la tasa de pérdida de paquetes y mayor retardo, causado por la aceptación de paquetes de mayor prioridad los cuales serán atendidos primero que los demás.

- **Factor de relación de rechazo ( $R_P$ ):** Este factor hace referencia a la cantidad de paquetes de la menor prioridad que se deben rechazar por cada paquete rechazado de la segunda prioridad. Es la cantidad máxima de información que se puede almacenar en la cola.

**Niveles de operación normal:**  $1 - \infty$  paquetes.

**Precisión de la medición:**  $\pm 1$  paquete.

**Niveles propuestos:** 1, 2, 3, 4 y 5 paquetes.

**Efecto previsto sobre la variable respuesta:** Se espera que a medida que se aumente este factor, aumente la tasa de pérdida de paquetes de la menor prioridad y se aumente el retardo debido a la presencia de mayor cantidad de paquetes de prioridades superiores en la cola.

## 4.3. Variable respuesta

- **Tasa de pérdida de paquetes (*Packet Loss Rate*):** Es la relación que existe entre la cantidad de paquetes enviados desde el transmisor con respecto a la cantidad de paquetes recibidos en el receptor. Se espera que esta relación o tasa sea la menor posible en aras de no obtener errores en la comunicación.

**Niveles de operación normal:** 0 - 1 %

**Precisión de la medición:**  $\pm 0.01\%$

**Instrumento de medida:** Dentro del escenario de simulación, se realizará un conteo de la cantidad de paquetes que se generan de forma aleatoria, y de la cantidad de paquetes que finalmente son servidos o atendidos por la estrategia de gestión de cola. De estos dos valores se realizará la relación de pérdida de paquetes para obtener la tasa.

- **Retardo (Delay):** Es el tiempo que se toma un paquete en ir desde el transmisor hasta el receptor. Un alto retardo ocasiona que la información que se transmite, tarde demasiado en llegar hasta el receptor, lo que representa un grave problema para las comunicaciones de información crítica.

**Niveles de operación normal:** 0 – 1s

**Precisión de la medición:**  $\pm 1\mu s$

**Instrumento de medida:** El retardo se estimará mediante la sincronización del transmisor y el receptor, el transmisor marcará cada paquete con la hora del envío la cuál es leída por el receptor para luego calcular el retardo del paquete.

## 4.4. Tratamientos

**Tabla 4-1:** Tratamientos

Constante de reserva ( $K$ )	Factor de relación de rechazo ( $R_P$ )				
	1	2	3	4	5
1	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5
2	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
4	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5
5	5-1	5-2	5-3	5-4	5-5

## 4.5. Número de réplicas y aleatorización de los tratamientos

Se realizarán 5 réplicas por tratamiento para un total de 125 observaciones, de esta forma se busca que los análisis realizados a estos datos reflejen de la forma más real posible, el

verdadero rendimiento que está ofreciendo la estrategia propuesta con respecto a los factores establecidos.

Para la aleatorización de las pruebas nos apoyaremos de la herramienta Microsoft Excel para que nos defina un orden aleatorio a partir de sus funciones. En la Tabla 4-2 se observa el orden de los tratamientos del experimento arrojado por la herramienta de aleatorización.

**Tabla 4-2:** Orden de los tratamientos

ORDEN	K	$R_p$												
1	5	4	26	3	5	51	3	4	76	1	2	101	5	2
2	3	5	27	2	4	52	2	2	77	4	4	102	1	1
3	4	5	28	4	5	53	3	5	78	5	2	103	2	2
4	1	3	29	2	1	54	5	2	79	4	2	104	2	3
5	2	3	30	5	3	55	4	1	80	1	4	105	5	2
6	3	1	31	4	1	56	2	3	81	5	1	106	5	4
7	4	5	32	1	3	57	5	4	82	1	1	107	3	2
8	2	4	33	2	4	58	4	2	83	5	1	108	5	5
9	1	2	34	3	1	59	2	1	84	4	4	109	2	2
10	4	3	35	1	3	60	1	5	85	5	5	110	4	3
11	3	1	36	3	4	61	5	4	86	1	3	111	2	1
12	2	5	37	3	3	62	1	2	87	1	4	112	1	2
13	3	3	38	1	1	63	2	3	88	3	2	113	2	4
14	2	5	39	4	3	64	2	1	89	4	2	114	3	3
15	1	5	40	5	2	65	5	5	90	3	3	115	5	1
16	1	4	41	4	1	66	5	5	91	4	3	116	3	1
17	4	1	42	4	4	67	5	3	92	1	5	117	2	5
18	3	2	43	4	2	68	1	4	93	5	1	118	5	4
19	2	2	44	2	4	69	4	4	94	3	3	119	4	1
20	3	5	45	3	1	70	2	3	95	3	5	120	2	2
21	4	5	46	1	5	71	1	5	96	5	3	121	3	4
22	2	5	47	4	4	72	2	1	97	5	3	122	5	3
23	4	3	48	1	1	73	1	2	98	3	4	123	4	5
24	5	1	49	1	3	74	3	4	99	2	5	124	4	2
25	3	2	50	1	4	75	5	5	100	1	1	125	3	2

## 4.6. Hipótesis preliminares del experimento

**Preferencias de diseño:** El experimento se realizará mediante el diseño factorial  $5^2$  de efectos fijos, en el cual se tienen 2 factores con 5 niveles por cada factor.

El modelo de efectos consta de 2 factores y busca la interacción entre ellos, de acuerdo a esto, la ecuación polinomial es mostrada en la ecuación 4-1.

$$Y_{ijl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijl} \quad (4-1)$$

Donde:

$l$  = Número de réplicas.

$Y_{ijl}$  = Variable respuesta (PLR o retardo).

$\mu$  = PLR promedio ó Retardo promedio.

$\alpha_i$  = Efecto debido al  $i$ -ésimo valor de  $K$ .

$\beta_j$  = Efecto debido al  $j$ -ésimo valor de  $R_P$ .

$(\alpha\beta)_{ij}$  = Efecto de interacción entre el  $i$ -ésimo valor de  $K$  y el  $j$ -ésimo valor de  $R_P$ .

$\varepsilon_{ijkl}$  = Error aleatorio.

Hipótesis de interés

$$H_0 : \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0$$

$$H_1 : \alpha_i \neq 0 \text{ para algún } i$$

- Hipótesis nula: Los efectos sobre la tasa de pérdida de paquetes o el retardo, de los 5 niveles de la constante de reserva son estadísticamente nulos; por lo tanto, el factor constante de reserva no es significativo para la variable respuesta.
- Hipótesis alternativa: Por lo menos un efecto de la tasa de pérdida de paquetes o el retardo, es diferente de cero; por lo tanto, el factor pérdida de paquetes o retardo es significativo para la variable respuesta.

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 \text{ para algún } j$$

- Hipótesis nula: Los efectos sobre la tasa de pérdida de paquetes o el retardo, de los 5 niveles del factor de relación de rechazo son estadísticamente nulos; por lo tanto, el factor de relación de rechazo no es significativo para la variable respuesta.
- Hipótesis alternativa: Por lo menos un efecto de la tasa de pérdida de paquetes o el retardo, es diferente de cero; por lo tanto, el factor pérdida de paquetes o retardo es significativo para la variable respuesta.

$H_0 : (\alpha\beta)_{ij} = 0$  para todo  $ij$

$H_0 : (\alpha\beta)_{ij} \neq 0$  para todo  $ij$

- Hipótesis nula: Los efectos sobre la tasa de pérdida de paquetes o el retardo, de las iteraciones de los 5 niveles entre la constante de reserva y el factor de relación de rechazo son estadísticamente nulos; por lo tanto, la iteración no es significativa para la variable respuesta.
- Hipótesis alternativa: Por lo menos uno de los valores de la iteración entre la constante de reserva y el factor de relación de rechazo, es diferente de cero; por lo tanto, la iteración es significativa para la variable respuesta.

# 5 Resultados experimentales

## 5.1. Retardo

Tabla 5-1: Estadísticos para el Retardo

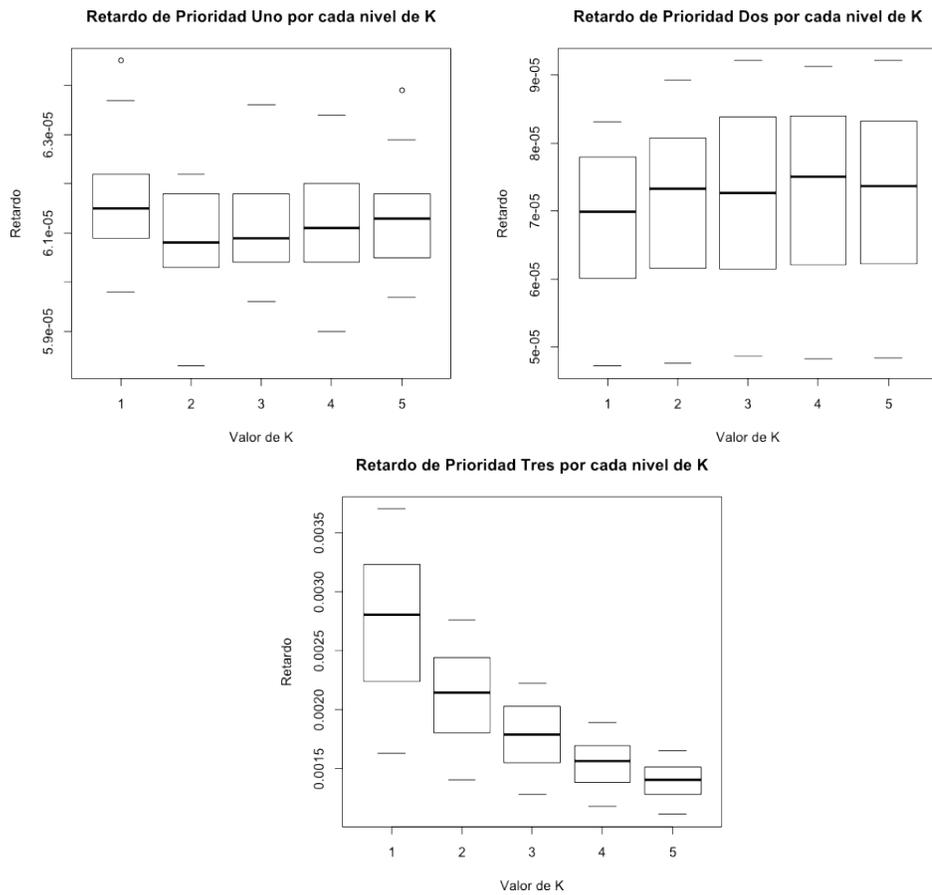
	Media	Mediana	Desviación
Prioridad 1	6.12e-05 seg	6.11e-05 seg	1.03e-06 seg
Prioridad 2	5.84e-05 seg	5.53e-05 seg	1.59e-05 seg
Prioridad 3	2.37e-03 seg	2.36e-03 seg	9.09e-04 seg

Con los datos obtenidos en las medidas de tendencia central y de dispersión se puede inferir que al ser los valores de las medias cercanos a las medianas, y los valores de la desviación pequeños con respecto a las unidades de la media y la mediana; que los valores no están muy dispersos y se concentran alrededor de la mediana. Esto puede significar que el cambio en los valores de los factores produce un comportamiento simétrico en la variable respuesta, es decir, los datos continúan estando cercanos a la mediana a pesar que ésta cambia a causa del cambio en el valor del factor.

De acuerdo a los gráficos de cajas en la Figura 5-1, y que muestran el cambio de valor en el factor  $K$  para cada prioridad, se puede observar que para las prioridades uno y dos este factor no resulta ser significativo, ya que se evidencia que el valor de la mediana es casi invariante ante el cambio de  $K$ . Caso contrario sucede con la prioridad tres, ya que se observa un cambio significativo para cada valor de  $K$ , mostrando una disminución del retardo a medida que el valor de  $K$  aumenta.

El factor  $R_P$  produce cambios significados en la prioridad dos y en la prioridad tres, de acuerdo a los resultados representados en la Figura 5-2. Por cada valor del factor  $R_P$ , los valores de la variable reaccionan de forma homogénea incrementándose a cada aumento del valor de  $R_P$ . Situación diferente sucede con la prioridad uno la cual se muestra invariante ante el cambio en el valor de  $R_P$ .

En conclusión, el cambio de valor en los factores no altera significativamente el retardo en la prioridad uno, lo que significa que la estrategia garantiza siempre el mejor comportamiento



**Figura 5-1:** Resultados de retardo para el factor K

para esta prioridad. Este resultado se da en sacrificio a los resultados en el retardo de las prioridades dos y tres, el cual si se ve afectado por el cambio en el valor de los factores. Este comportamiento es precisamente el que busca la estrategia, ofrecer mejores garantías en todo momento a los paquetes más importantes ante cualquier situación en el escenario evaluado.

#### ■ Modelo ANOVA

**Tabla 5-2:** ANOVA Retardo Prioridad uno

Prioridad 1	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
$K$	1	1.50e-13	1.54e-13	0.125	0.725
$R_P$	1	3.30e-13	3.31e-13	0.269	0.605
$K : R_P$	1	4.20e-13	4.21e-13	0.341	0.56
Residuales	121	1.49e-10	1.23e-12		

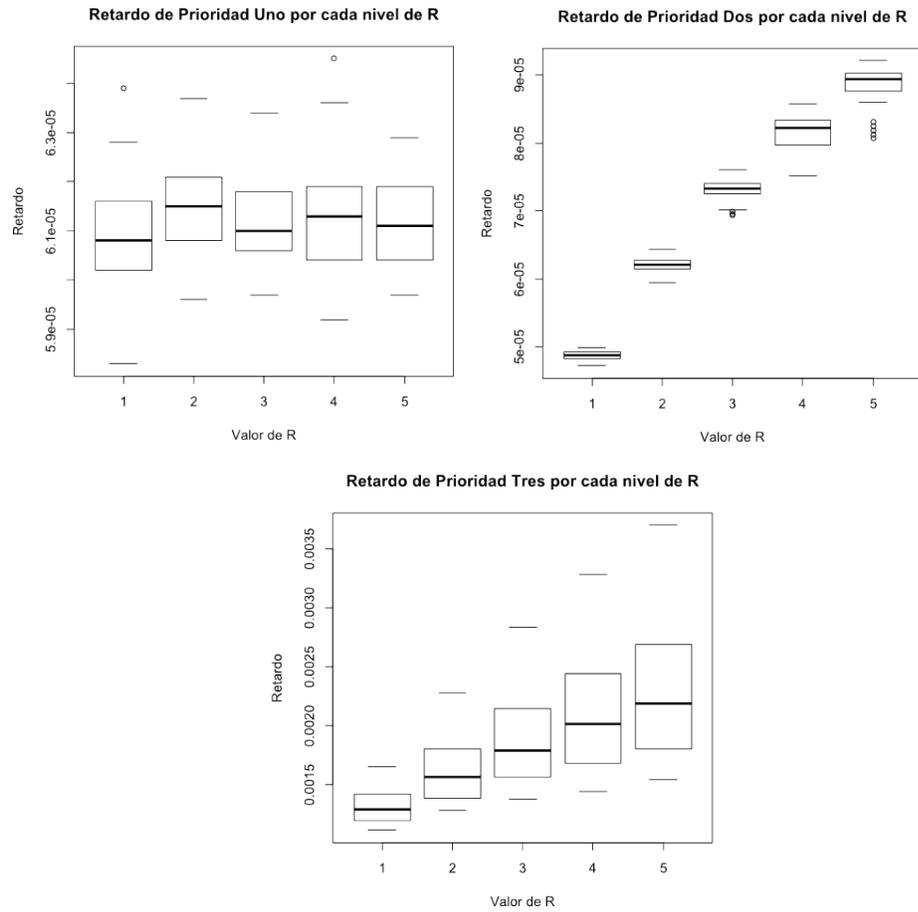


Figura 5-2: Resultados de retardo para el factor  $R_p$

Tabla 5-3: ANOVA Retardo Prioridad dos

Prioridad 2	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
$K$	1	2.92e-10	2.92e-10	52.86	3.87e-11
$R_P$	1	2.42e-08	2.42e-08	4378	<2e-16
$K : R_P$	1	8.60e-11	8.60e-11	15.65	0.000129
Residuales	121	6.69e-10	6.00e-12		

Tabla 5-4: ANOVA Retardo Prioridad tres

Prioridad 3	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
$K$	1	2.56e-05	2.56e-05	1246.2	<2e-16
$R_P$	1	1.70e-05	1.70e-05	824.1	<2e-16
$K : R_P$	1	4.07e-06	4.07e-06	197.9	<2e-16
Residuales	121	2.49e-06	2.10e-08		

Para apoyar las conclusiones acerca de la significancia de cada factor sobre la variable respuesta, se puede evaluar el resultado del valor-p de cada factor con respecto al valor de riesgo que asume el investigador. El valor de riesgo considerado en el modelo ANOVA es de 0.05, por lo tanto, es necesario observar si el valor-p obtenido de cada factor es mayor o menor a este valor de riesgo; si es mayor se concluye que el factor NO es significativo, si es menor se dice que el factor SI es significativo en la variabilidad de la variable respuesta.

En este caso, de acuerdo al valor-p de cada factor para cada variable respuesta, se concluye que:

- Los factores  $K$  y  $R_P$  al igual que su interacción no son significativos para el retardo de la prioridad uno.
- Para la prioridad dos y la prioridad tres, tanto el factor  $K$ , como el factor  $R_P$  y su interacción, son significativos para la variabilidad del retardo en esta prioridad, es decir, estas prioridades son muy sensible a cualquier cambio de los parámetros de configuración de la estrategia.
- La prioridad tres resulta ser la más sensible ante los cambios en el valor de los factores, es decir, los valores de la variable respuesta de esta prioridad presentan una mayor variabilidad ante cada nivel de cada factor, en comparación con las otras prioridades.

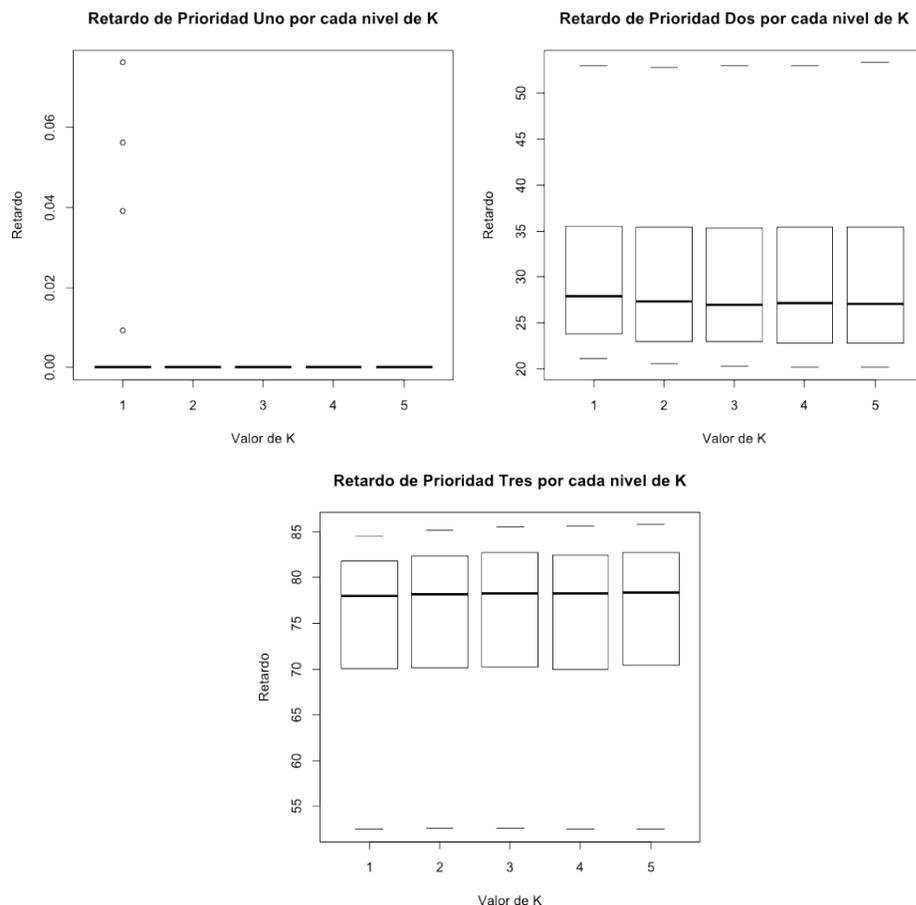
Se puede evidenciar que los resultados de la ANOVA corroboran el análisis preliminar realizado en base a los gráficos de cajas.

## 5.2. Tasa de Pérdida de Paquetes

**Tabla 5-5:** Estadísticos para la Tasa de Pérdida de Paquetes

	Media	Mediana	Desviación
Prioridad 1	0.026 %	0 %	0.041 %
Prioridad 2	35.574 %	35.214 %	10.805 %
Prioridad 3	69.933 %	70.512 %	10.893 %

Los valores estadísticos de media, mediana y desviación obtenidos de la variable respuesta para cada prioridad muestran un comportamiento similar, siendo la media y la mediana muy cercanos y la desviación igual para cada prioridad a excepción de la prioridad uno, donde el valor de la mediana tiene un orden diferente a las otras dos prioridades, y por consecuencia la desviación obedece a ese orden.

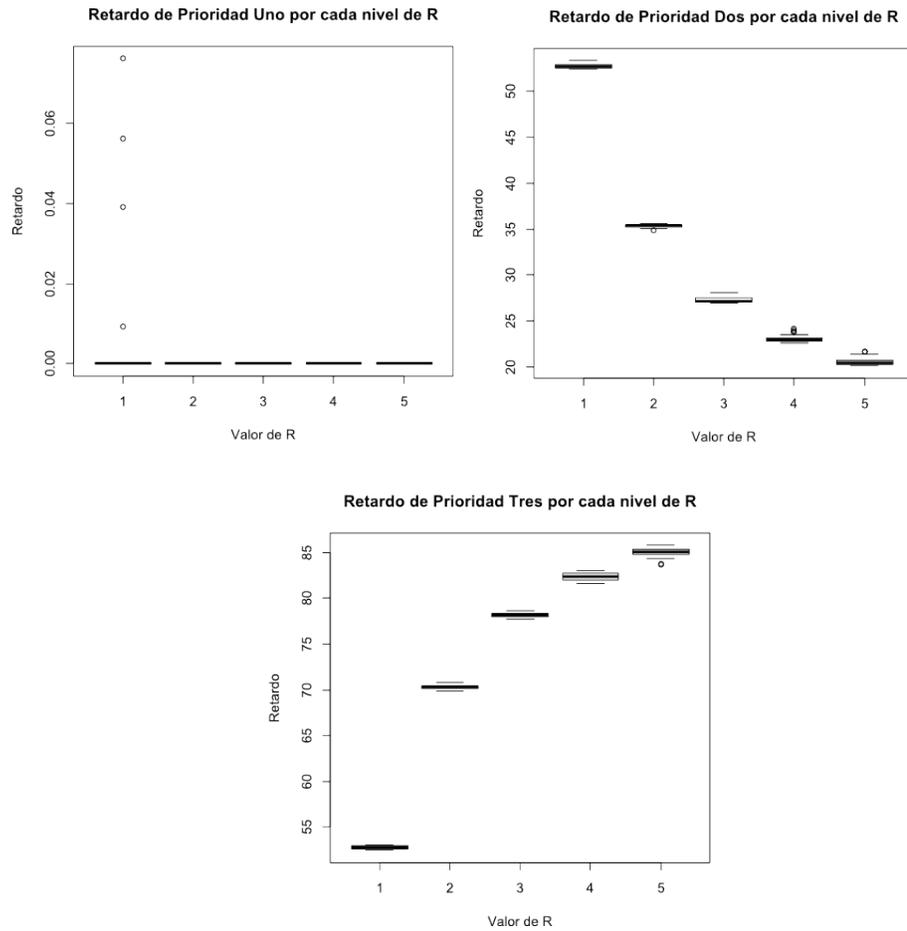


**Figura 5-3:** Resultados de PLR para el factor  $K$

En conclusión, se puede observar que el porcentaje de paquetes perdidos aumenta de acuerdo a la prioridad, siendo menor para los paquetes importantes tal y como se esperaba de acuerdo a las características de la estrategia.

De acuerdo a los gráficos de cajas de la Figura 5-3, la tasa de pérdida de paquete no se ve afectada para ninguna prioridad ante un cambio en el valor del factor  $K$ . Los gráficos muestran que la mediana y la dispersión de los datos permanecen casi invariantes ante todos los niveles del factor  $K$ , eso quiere decir que este factor no es significativo para la variable respuesta.

El factor  $R_P$ , en comparación con el factor  $K$ , produce cambios significados en la prioridad dos y en la prioridad tres, de acuerdo a los resultados representados en los gráficos de cajas de la Figura 5-4. En la prioridad dos se puede observar que a medida que aumenta el valor de  $R_P$ , la tasa de pérdida de paquetes disminuye, mientras que en la prioridad tres la tasa de pérdida de paquetes aumenta. Este comportamiento permite inferir que el factor  $R_P$  es significativo para las prioridades dos y tres, pero no para la prioridad uno.



**Figura 5-4:** Resultados de PLR para el factor  $R_P$

Como conclusión general, se puede señalar que la estrategia ofrece las mejores características de transmisión en cuanto a tasa de pérdida de paquetes para la prioridad uno, ya que éstas son las menores posibles y son constantes a pesar del cambio en los valores del factor  $R_P$ . Esta conclusión en comunión con la expresada para el retardo, permite asegurar que la prioridad uno siempre tendrá las mejores características de retardo y tasa de pérdida de paquetes ante cualquier cambio en las condiciones de los factores de la estrategia.

- **Modelo ANOVA**

**Tabla 5-6:** ANOVA PLR Prioridad uno

Prioridad 1	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
$K$	1	0.000522	5.23e-04	7.69	0.006434
$R_P$	1	0.000522	5.23e-04	7.69	0.006434
$K : R_P$	1	0.001045	1.04e-03	1.54e+01	0.000146
Residuales	121	0.008221	6.79e-05		

**Tabla 5-7:** ANOVA PLR Prioridad dos

Prioridad 2	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
$K$	1	4	4	2.26e-01	0.635
$R_P$	1	14605	1.46e+04	8.11e+02	<2e-16
$K : R_P$	1	3	3	1.50e-01	0.699
Residuales	121	2178	1.80e+01		

**Tabla 5-8:** ANOVA PLR Prioridad tres

Prioridad 3	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
$K$	1	4	4	2.30e-01	0.632
$R_P$	1	14594	1.46e+04	8.12e+02	<2e-16
$K : R_P$	1	3	3	1.41e-01	0.708
Residuales	121	2176	1.80e+01		

Para concluir sobre la significancia, es necesario evaluar el resultado del valor-p de cada factor con respecto al valor de riesgo que asume el investigador. El valor de riesgo considera en el modelo ANOVA es de 0.05, por lo tanto, es necesario observar si el valor-p obtenido de cada factor es mayor o menor a este valor de riesgo; si es mayor se concluye que el factor NO es significativo, si es menor se dice que el factor SI es significativo en la variabilidad de la variable respuesta.

En este caso, de acuerdo al valor-p de cada factor para cada variable respuesta, se concluye que:

- La variabilidad en el factor  $R_P$  y es significativo para la variación en la tasa de pérdida de paquetes de todas las prioridades.
- Para la prioridad uno, el factor  $K$  resulta ser significativo para la variable respuesta, en contraste con la prioridad dos y la prioridad tres para las cuales no resulta ser significativo.

El resultado de la ANOVA no difiere mucho en el análisis realizado a los gráficos de cajas. En los gráficos se aprecia que el factor  $K$  no es significativo para ninguna de las prioridades, sin embargo, los resultados de la ANOVA dicen que es significativo solo para la prioridad uno. En general, los resultados de la ANOVA confirman los análisis hechos de los gráficos.

# 6 Conclusiones y trabajo futuro

## 6.1. Conclusiones

Los servicios de telemedicina han mostrado un incremento a nivel mundial. En Colombia existen servicios de hospitalización domiciliaria pero no se ha avanzado a la integración de las TIC en este tipo de servicios, por lo cual resultan bastante útiles propuestas como la planteada en este trabajo, que buscan ofrecer las condiciones técnicas adecuadas para la implementación de los servicios de monitoreo remoto de salud de forma eficiente.

Las estrategias de AQM son alternativas adecuadas para ofrecer QoS a los servicios que se implementan en escenarios donde no es posible tener acceso a los equipos de la red de transporte, ya que permite tomar decisiones en la priorización y clasificación del tráfico desde el transmisor.

Las estrategias de AQM basadas en RED han sido utilizadas para diferentes propósitos como priorización de tráfico, categorización de tráfico entre otros, tanto en el ámbito de las redes LAN como en internet, y han sido útiles para desarrollar una estrategia de QoS para tráfico de telemedicina en un escenario en el cual no se tiene control sobre los equipos de la red de transporte.

Se propone una estrategia de Administración Activa de Colas basada en RED que cuenta con un control adaptativo basado en la ocupación de la cola. La estrategia utiliza un mecanismo de control para la aceptación de los paquetes, de acuerdo con 3 categorías que representan las prioridades con que son tratados. La ocupación de la cola define hasta dónde son aceptados los paquetes de cada una de las categorías, con el objetivo de ofrecer mejores características de calidad de servicio a las categorías superiores.

En general, con qob A-RED se obtuvo una mejora promedio del 60 % en la tasa de paquetes perdidos y del 65 % en el retardo para la prioridad más alta, a costa de una disminución promedio del 23 % en la tasa de paquetes perdidos y del 8 % en el retardo de la prioridad más baja. A pesar de esta disminución, la estrategia logra cumplir con los requerimientos mínimos de retardo para el tráfico de telemedicina.

El cambio en los valores de los parámetros de configuración de la estrategia influye signi-

ficativamente en los valores obtenidos de retardo y tasa de pérdida de paquetes, situación que permite realizar los ajustes precisos para obtener los resultados de QoS requeridos por el tráfico de telemedicina.

La estrategia qob A-RED basada en RED desarrollada en este trabajo cumple con los requerimientos de retardo y tasa de pérdida de paquetes que exige el tráfico de telemedicina para una transmisión con QoS.

Si bien no se hace un cálculo cuantitativo de las características de estabilidad, robustez, sensibilidad y escalabilidad que definen el rendimiento de una estrategia de AQM, si se realizaron pruebas de desempeño ante escenarios adversos como la presencia de ráfagas, de las cuales se obtuvieron resultados satisfactorios, ya que la estrategia nunca dejó de responder ni de aplicar sus funciones principales de control.

De acuerdo a los resultados obtenidos ante las pruebas en escenarios adversos, se puede concluir cualitativamente que la estrategia cuenta con robustez, ya que siempre funcionó correctamente a pesar de condiciones poco favorables como por ejemplo, la presencia fortuita de ráfagas de paquetes de la mayor prioridad.

La estrategia tiene entre sus parámetros de configuración iniciales la tasa de servicio, lo que permite que este valor sea modificado de acuerdo a las condiciones de la red en la cual se implemente, siendo de esta forma escalable a diferentes condiciones de la red.

La estrategia cuenta con criterios de equidad ya que atiende todo tipo de paquetes sin perder de vista las prioridades, ofreciendo un tratamiento especial a los paquetes que tienen mayor importancia para el escenario, pero sin dejar de aceptar los paquetes de las otras prioridades en la medida que la cola ofrezca las condiciones adecuadas para hacerlo.

## 6.2. Trabajo futuro

Se propone como trabajo futuro la implementación de esta estrategia en un escenario real, con el objetivo de confirmar los resultados obtenidos en el escenario de simulación aplicado y analizado en este trabajo.

Evaluar de forma cuantitativa cada uno de los parámetros de desempeño de la AQM (Estabilidad, Robustez, Sensibilidad y Escalabilidad), con el fin de encontrar el punto óptimo de funcionamiento de la estrategia.

Evaluar la estrategia con un tipo de tráfico diferente a telemedicina con el objetivo de conocer su funcionamiento, y si es necesario, realizar ajustes para que la estrategia funcione en varios escenarios.

Comparar los resultados de los parámetros de QoS de la estrategia propuesta en este trabajo, contra los resultados de otras estrategias que no requieran control de la red.

# Bibliografía

- [1] Fontane -Projektidee. [En Línea] *Disponible en:* <http://www.gesundheitsregion-nordbrandenburg.de/index.php?id=7>, [Consultado: 31-mar-2014]
- [2] Operating Systems and Middleware Group at HPI - SaPiMa. [En Línea] *Disponible en:* <http://www.dcl.hpi.uni-potsdam.de/research/sapima/>, [Consultado: 13-mar-2014]
- [3] Simpy - Overview. [En Línea] *Disponible en:* <https://simpy.readthedocs.io/en/latest/>, [Consultado: 24-ene-2017]
- [4] WHO | Global Observatory for eHealth. [En Línea] *Disponible en:* <http://www.who.int/goe/en/>, [Consultado: 02-mar-2016]
- [5] ADAMS, R.: Active Queue Management: A Survey. En: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 15 (2013), Nr. 3, p. 1425–1476. – ISSN 1553–877X
- [6] ADIBI, Sasan: Biomedical Sensing Analyzer (BSA) for Mobile-Health (mHealth)-LTE. En: *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics* (2014), p. 345 – 351. – ISSN 2168–2194, 2168–2208
- [7] ALAHMADI, A. ; SOH, B.: A smart approach towards a mobile e-health monitoring system architecture. En: *2011 International Conference on Research and Innovation in Information Systems (ICRIIS)*, p. 1–5
- [8] ARPACI, Mutlu ; COPELAND, John A.: An adaptive queue management method for congestion avoidance in TCP/IP networks. En: *Global Telecommunications Conference, 2000. GLOBECOM'00. IEEE* Vol. 1, IEEE, 2000, p. 309–315
- [9] ATHURALIYA, Sanjeeva ; LOW, Steven H. ; LI, Victor H. ; YIN, Qinghe: REM: active queue management. En: *Network, IEEE* 15 (2001), Nr. 3, p. 48–53
- [10] BARRING, C. B.: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Anonymous Communication Rejection (ACR) and Communication.
- [11] BARUA, M. ; ALAM, M.S. ; LIANG, Xiaohui ; SHEN, Xuemin: Secure and quality of service assurance scheduling scheme for WBAN with application to eHealth. En: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2011, p. 1102–1106

- [12] BHARGAVA, A. ; FARRUKH KHAN, M. ; GHAFOOR, A.: QoS management in multimedia networking for telemedicine applications. En: *IEEE Workshop on Software Technologies for Future Embedded Systems, 2003*, p. 39–42
- [13] BRADEN, Bob ; CLARK, David ; CROWCROFT, Jon ; DAVIE, Bruce ; DEERING, Steve ; ESTRIN, Deborah ; FLOYD, Sally ; JACOBSON, Van ; MINSHALL, Greg ; PARTRIDGE, Craig ; OTHERS: Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet. En: *The Internet Society* (1998)
- [14] BRANDAUER, Christof ; IANNACCONE, Gianluca ; DIOT, Christophe ; ZIEGLER, Thomas ; FDIDA, Serge ; MAY, Martin: Comparison of tail drop and active queue management performance for bulk-data and web-like Internet traffic. En: *Computers and Communications, 2001. Proceedings. Sixth IEEE Symposium on*, IEEE, 2001, p. 122–129
- [15] BYUN, Do J. ; BARAS, John S.: A new rate-based active queue management: adaptive virtual queue RED. En: *Communication Networks and Services Research, CNSR'07. Fifth Annual Conference on*, IEEE, 2007, p. 389–396
- [16] CHIGAN, Chunxiao ; OBEROI, V.: Providing QoS in ubiquitous telemedicine networks. En: *Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, 2006. PerCom Workshops 2006*, p. 5 pp.–500
- [17] CHUNG, Jae. ; CLAYPOOL, Mark: Rate-Based Active Queue Management with Priority Classes for Better Video Transmission. En: *Proceedings of the Seventh International Symposium on Computers and Communications (ISCC 2002)* (2002), p. 99–105
- [18] CLARK, David D. ; FANG, Wenjia: Explicit allocation of best-effort packet delivery service. En: *Networking, IEEE/ACM Transactions on* 6 (1998), Nr. 4, p. 362–373
- [19] CLAYPOOL, Mark ; CHUNG, Jae: Dynamic-CBT–Better Performing Active Queue Management for Multimedia Networking. En: *The 10th International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV) On-Line Proceedings*, 2000
- [20] COLEMAN, David E. ; MONTGOMERY, Douglas C.: A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment. En: *Technometrics* 35 (1993), Februar, Nr. 1, p. 1. – ISSN 00401706
- [21] COTTA, Rosângela Minardi M. ; MORALES SUÁREZ-VARELA, M. ; GONZÁLEZ, Agustín L. ; COTTA FILHO, José S. ; REAL, Enrique R. ; DÍAS RICOS, A. J. ; OTHERS: La hospitalización domiciliaria: antecedentes, situación actual y perspectivas. En: *American Journal of Public Health* 10 (2001), Nr. 1, p. 45–55

- [22] DE CNODDER, Stefaan ; PAUWELS, Kenny ; ELLOUMI, Omar: A rate based RED mechanism. En: *The 10th International Workshop on Network and Operating System Support for Digital Audio and Video (NOSSDAV) On-Line Proceedings*, 2000
- [23] DENG, Xidong ; YI, Sungwon ; KESIDIS, George ; DAS, Chita R.: Stabilized virtual buffer (SVB)-an active queue management scheme for internet Quality-of-Service. En: *Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM'02. IEEE* Vol. 2, IEEE, 2002, p. 1628–1632
- [24] DOSHI, Bharat T. ; EGGENSCHWILER, Dominik ; RAO, Aswath ; SAMADI, Behrokh ; WANG, Y. T. ; WOLFSON, James: VoIP network architectures and QoS strategy. En: *Bell Labs Technical Journal* 7 (2003), April, Nr. 4, p. 41–59. – ISSN 10897089
- [25] DU, Qinghe ; ZHANG, Xi: Statistical QoS provisionings for wireless unicast/multicast of multi-layer video streams. En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 28 (2010), April, Nr. 3, p. 420–433. – ISSN 0733–8716
- [26] ELLOUMI, Omar. ; DE CNODDER, Stefaan. ; PAUWELS, Kenny: Usefulness of three drop precedences in Assured Forwarding service. En: *Internet Engineering Task Force (IETF) Internet Draft* (1999)
- [27] FIROIU, Victor ; BORDEN, Marty: A study of active queue management for congestion control. En: *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* Vol. 3, IEEE, 2000, p. 1435–1444
- [28] FLOYD, Sally ; GUMMADI, Ramakrishna ; SHENKER, Scott ; OTHERS: *Adaptive RED: An algorithm for increasing the robustness of RED's active queue management*. Technical report, ICSI, 2001
- [29] FLOYD, Sally ; JACOBSON, Van: Random early detection gateways for congestion avoidance. En: *Networking, IEEE/ACM Transactions on* 1 (1993), Nr. 4, p. 397–413
- [30] GALLEGO, J.R. ; HERNANDEZ-SOLANA, A. ; CANALES, M. ; LAFUENTE, J. ; VALDOVINOS, A. ; FERNANDEZ-NAVAJAS, J.: Performance Analysis of Multiplexed Medical Data Transmission for Mobile Emergency Care Over the UMTS Channel. En: *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 9 (2005-03), Nr. 1, p. 13–22. – ISSN 1089–7771
- [31] GARAWI, S. ; ISTEPANIAN, R. S H. ; ABU-RGHEFF, M.A.: 3G wireless communications for mobile robotic tele-ultrasonography systems. 44, Nr. 4, p. 91–96. – ISSN 0163–6804
- [32] GRASCHEW, Georgi ; ROELOFS, Theo A.: *Advances in telemedicine applications in various medical disciplines and geographical regions*. InTech. – ISBN 9789533071619

- [33] HENTSCHEL, U. ; KHALID, F. ; POLZE, A.: An Approach to Control Transmission of Medical Data over Cellular Networks Using Location Information. En: *IEEE 15th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, 2012, p. 87–94
- [34] HOLLOT, C. V. ; MISRA, Vishal ; TOWSLEY, Don ; GONG, Wei-Bo: A control theoretic analysis of RED. En: *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* Vol. 3, IEEE, 2001, p. 1510–1519
- [35] HU, Liuqia ; KSHEMKALYANI, Ajay D.: HRED: a simple and efficient active queue management algorithm. En: *Computer Communications and Networks, 2004. ICCCN 2004. Proceedings. 13th International Conference on*, IEEE, 2004, p. 387–393
- [36] ICHIHASHI, F. ; SANKAI, Y.: Development of a Portable Vital Sensing System for Home Telemedicine. En: *29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007*, p. 5872–5877
- [37] ISTEPANIAN, Robert ; PHILIP, Nada ; MARTINI, Maria: Medical QoS provision based on reinforcement learning in ultrasound streaming over 3.5G wireless systems. En: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 27 (2009-05), Nr. 4, p. 566–574. – ISSN 0733–8716
- [38] JAIN, Raj ; OTHERS: Congestion control in computer networks: Issues and trends. En: *IEEE Network* 4 (1990), Nr. 3, p. 24–30
- [39] KOO, Jahon ; SONG, Byunghun ; CHUNG, Kwangsue ; LEE, Hyukjoon ; KAHNG, Hyun-kook: MRED: a new approach to random early detection. En: *Information Networking, 2001. Proceedings. 15th International Conference on*, IEEE, 2001, p. 347–352
- [40] KOUTSAKIS, P. ; PSYCHIS, S. ; PATERAKIS, M.: Integrated wireless access for video-conference from MPEG-4 and H.263 video coders with voice, E-mail, and web traffic. 54, Nr. 5, p. 1863–1874. – ISSN 0018–9545
- [41] LE, Long ; AIKAT, Jay ; JEFFAY, Kevin ; SMITH, F. D.: The effects of active queue management on web performance. En: *Proceedings of the 2003 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, ACM, 2003, p. 265–276
- [42] LIN, Dong ; MORRIS, Robert: Dynamics of random early detection. En: *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* Vol. 27, ACM, 1997, p. 127–137
- [43] LONG, Chengnian ; ZHAO, Bin ; GUAN, Xinping ; YANG, Jun: The Yellow active queue management algorithm. En: *Computer Networks* 47 (2005), März, Nr. 4, p. 525–550. – ISSN 13891286

- [44] LUKNÁROVÁ, Denisa ; MEDVECKÝ, Martín: Performance comparison of A-RIO, RB-nRED and WRED algorithms for QoS support. En: *Elektrorevue* 1 (2010), Juni, Nr. 2, p. 8–15. – ISSN 1213–1539
- [45] MARTINEZ, I. ; GARCIA, J. ; VIRUETE, E. ; FERNANDEZ, J.: Application Parameters Optimization to Guarantee QoS in e-Health Services. En: *28th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS '06*, 2006, p. 5222–5225
- [46] NABESHIMA, M.: Improving the performance of active buffer management with per-flow information. En: *IEEE Communications Letters* 6 (2002), Juli, Nr. 7, p. 306–308. – ISSN 1089–7798
- [47] NANDA, P. ; FERNANDES, R.C.: Quality of Service in Telemedicine. En: *First International Conference on the Digital Society, ICDS '07.*, 2007, p. 2–7
- [48] OROZCO, Julio ; ROS, David: An Adaptive RIO (A-RIO) queue management algorithm. En: *Quality for All Proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2003. – ISBN 978–3–540–45188–4, p. 11–20
- [49] ORUGANTI, Sai S. ; DEVETSIKIOTIS, Michael: Analyzing robust active queue management schemes: a comparative study of predictors and controllers. En: *Communications, 2003. ICC'03. IEEE International Conference on* Vol. 3, IEEE, 2003, p. 1531–1536
- [50] PLETKA, Roman ; KIND, Andreas ; WALDVOGEL, Marcel ; MANNAL, Soenke: Closed-loop congestion control for mixed responsive and non-responsive traffic. En: *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM'03. IEEE* Vol. 7, IEEE, 2003, p. 4180–4185
- [51] PLETKA, Roman ; WALDVOGEL, Marcel ; MANNAL, Soenke: PURPLE: predictive active queue management utilizing congestion information. En: *Local Computer Networks, 2003. LCN'03. Proceedings. 28th Annual IEEE International Conference on*, IEEE, 2003, p. 21–30
- [52] DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, Ministerio (Ed.): *Análisis de Situación de Salud en Colombia 2014*. Ministerio de Salud y Protección Social, 2015
- [53] QIAO, Lu ; KOUTSAKIS: Adaptive Bandwidth Reservation and Scheduling for Efficient Wireless Telemedicine Traffic Transmission. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 60 (2011), Nr. 2, p. 632–643. – ISSN 0018–9545
- [54] RYU, Seungwan ; CHO, Chulhyoe: PI-PD-controller for robust and adaptive queue management for supporting TCP congestion control. En: *Simulation Symposium, 2004. Proceedings. 37th Annual*, IEEE, 2004, p. 132–139

- [55] RYU, Seungwan ; RUMP, Christopher ; QIAO, Chunming: Advances in active queue management (AQM) based TCP congestion control. En: *Telecommunication Systems* 25 (2004), Nr. 3-4, p. 317–351
- [56] SCHWAIBOLD, Matthias ; GMELIN, Moritz ; VON WAGNER, Gero ; SCHÖCHLIN, Jürgen ; BOLZ, Armin: Key factors for personal health monitoring and diagnosis device. En: *Mobile Computing in Medicine*, Citeseer, 2002, p. 143–150
- [57] SEDDIGH, Nabil ; NANDY, Biswajit ; PIEDA, Peter S. ; SALIM, Jamal H. ; CHAPMAN, Alan: Experimental study of assured services in a Diffserv IP QoS network. En: *SPIE Proceedings* Vol. 3529, 1998, p. 217–230
- [58] SKORIN-KAPOV, Lea ; MATIJASEVIC, Maja: Analysis of QoS Requirements for e-Health Services and Mapping to Evolved Packet System QoS Classes. 2010, p. 1–18. – ISSN 1687–6415, 1687–6423
- [59] SU, Yi-Sheng ; SU, Szu-Lin ; LI, Jung-Shian: Joint Topology-Transparent Scheduling and QoS Routing in Ad Hoc Networks. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 63 (2014), Januar, Nr. 1, p. 372–389. – ISSN 0018–9545, 1939–9359
- [60] SUN, Wei ; SHIN, Kang G.: TCP performance under aggregate fair queueing. En: *Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM'04. IEEE* Vol. 3, IEEE, 2004, p. 1308–1313
- [61] VERGADOS, D.J. ; VERGADOS, D.D. ; MAGLOGIANNIS, I.: NGL03-6: Applying Wireless DiffServ for QoS Provisioning in Mobile Emergency Telemedicine. En: *IEEE Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06*, p. 1–5
- [62] VOUYIOUKAS, D. ; MAGLOGIANNIS, I. ; KOMNAKOS, D.: Emergency m-Health Services through High-Speed 3G Systems: Simulation and Performance Evaluation. 83, Nr. 4, p. 329–345. – ISSN 0037–5497
- [63] WANG, Chongyng ; LI, Bin ; THOMAS HOU, Y. ; SOHRABY, Kazem ; LIN, Yu: LRED: a robust active queue management scheme based on packet loss ratio. En: *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies* Vol. 1, IEEE, 2004
- [64] WANG, Xinyu ; AZIZOGLU, Murat: On the dropping probability function in active queue management schemes. En: *Global Telecommunications Conference, 2001. GLOBECOM'01. IEEE* Vol. 4, IEEE, 2001, p. 2511–2516
- [65] WORLD HEALTH ORGANIZATION: *Management of patient information: trends and challenges in member states*. World Health Organization. – ISBN 9241504641

- 
- [66] WORLD HEALTH ORGANIZATION (Ed.): *Telemedicine: opportunities and developments in member states: report on the second Global survey on eHealth*. Geneva, Switzerland : World Health Organization, 2010 (Global observatory for eHealth series 2). – ISBN 978-92-4-156414-4
- [67] WU, Tao ; XU, Hong-Bing ; TIAN, Shu-Ling: End to end congestion control and active queue management. En: *Machine Learning and Cybernetics, 2003 International Conference on* Vol. 2, IEEE, 2003, p. 946–950
- [68] ZHU, Chengyu ; YANG, Oliver W. ; AWEYA, James ; OUELLETTE, Michel ; MONTUNO, Delfin Y.: A comparison of active queue management algorithms using the OPNET Modeler. En: *Communications Magazine, IEEE* 40 (2002), Nr. 6, p. 158–167
- [69] ZVIKHACHEVSKAYA, A. ; MARKARIAN, G. ; MIHAYLOVA, L.: Quality of Service Consideration for the Wireless Telemedicine and E-Health Services. En: *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2009. WCNC 2009*, p. 1–6