



Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Buenos Aires

Teoria de Control
Curso: K4521
Turno: Mañana

TRABAJO PRÁCTICO INTEGRADOR

TCP Control de Congestion

Apellido y Nombre	Email	Legajo
BORDA, JUAN IGNACIO	jborda@frba.utn.edu.ar	1732390
PEREDA, MATIAS	mpereda@frba.utn.edu.ar	2039448

DOCENTE:	Omar Civale
FECHA DE PRESENTACIÓN:	21/11/25

Pautas

1. Objeto de este documento

- Proporcionar una guía de orientación para el desarrollo del Trabajo de Integración de Teoría de Control (oportunamente explicitado en sucesivas clases desde el inicio de la cursada).
- Contiene el propósito, objetivos del trabajo, las pautas a seguir y las recomendaciones correspondientes.

2. Propósito

- Aplicar la totalidad de los conceptos fundamentales de la Teoría de Control a un sistema controlado elegido por cada equipo de trabajo.

3. Objetivos Generales

- Seleccionar un sistema de control aplicado a una solución tecnológica (preferentemente, del área de sistemas de la información).
- Fundamentar el sistema propuesto utilizando, a modo de marco teórico, los conceptos, fundamentos, enfoques y estrategias de la Ingeniería de Control.
- Aplicar diferentes técnicas o herramientas informáticas, en forma creativa, para realizar gráficos, modelos, cuadros comparativos, y, en general para expresar el análisis del problema y la solución propuesta.

4. Pautas

• Desarrollo del trabajo

El trabajo de investigación será desarrollado por equipos de no más de dos integrantes.

La fecha de entrega del Trabajo Final será informada mediante la plataforma del webcampus. Esta fecha permitirá la corrección del mismo antes de la primera fecha de llamado a final.

Para el caso de que el TP no sea aprobado y requiera de correcciones y/o mayor desarrollo, o no haya sido presentado hasta la fecha indicada, se estipulará una nueva fecha tope de entrega mediante el mismo procedimiento. (Preferentemente, y por la condición excluyente de aprobación de la materia se sugiere entregarlo antes de las fechas indicadas).

Una vez aprobado el TP, y en caso de tener cumplimentadas la totalidad de las actividades obligatorias pautadas, el alumno estará en condiciones de firmar la libreta. Para ello, se pautarán fechas a tal efecto.

La entrega se realizará en formato de archivo PDF por cada alumno en el web campus del curso (en el sitio dedicado a tal efecto).

En cada trabajo se incluirá en la carátula el listado de integrantes del grupo.

Pueden realizarse consultas durante el período de desarrollo.

- **Composición del Trabajo de Investigación**

El trabajo, desde el punto de vista formal, estará compuesto de las siguientes partes:

- **Carátula:** incluye el tema e integrantes del equipo de trabajo.
- **Copia del presente documento.**
- **Índice:** contenido del documento elaborado por el equipo.
- **Introducción:** se referirá al “segmento / mercado” en que se encuadra el trabajo (por ejemplo, “...el control del riego y la fertilización de una plantación...”).
- **Objetivos:** cuales son los objetivos de control a ser alcanzados y cual es la solución que se plantea u ofrece.
- **Alcance:** definir la estructura del sistema considerado, describiendo e identificando clara y explícitamente las diferentes funcionalidades correspondientes al mismo (por ejemplo: contexto; puntos de interconexión con el mundo exterior; tipo de transductores; variables que se desea controlar, tipos unidades y rangos de entradas y salidas, amplificador de error; señales de error y realimentación; elementos de medición, características y variables componentes de las transferencias presentes en el sistema ; características de la respuesta; perturbaciones externas e internas a considerar; características y tipo de error; caracterización de la estabilidad; ley de control y tipo de actuación utilizada; relación entre señales analógicas y discretas / digitales; carga/s asociadas al sistema).

El trabajo deberá incluir un programa confeccionado en **LOGO** (en lenguaje de bloques), que permita simular y verificar la funcionalidad del sistema.

IMPORTANTE: Tal lo explicitado en clase, no se solicita la descripción genérica del sistema controlado sino la identificación y descripción de su estructura.

En definitiva, “encontrar” la totalidad de los contenidos y conceptos trabajados y estudiados desde el dominio de la teoría de control.

- **Descripción, desarrollo y fundamentación de la propuesta:** debe ser clara, recomendándose técnicas de escritura conceptual y gráfica.
- **Conclusión:** A modo de conclusión, establecer la necesidad y ventajas comparativas del sistema de control propuesto. Es importante incluir opiniones del grupo en cuanto a posibles mejoramientos, objeciones, etc., que permitan establecer un cierto **criterio ingenieril** desde la perspectiva del equipo de trabajo.
- **Consideraciones especiales:** si aplica, indicar.
- **Bibliografía:** citar libros, documentos de texto y fotográficos, folletos de dispositivos transductores, actuadores, sitios web y papers consultados.

Índice

Introducción	5
Objetivos	6
Alcance	7
Contexto	7
Puntos de interconexión con el mundo exterior	7
Estructura general del sistema	7
Diagrama de Bloques y Elementos del Sistema	8
Estructura del sistema de control	8
Carga del Sistema	10
Características y Tipo de Error	10
Variables que se desea controlar	11
Tipos de unidades	11
Amplificador de error	11
Estabilidad	12
Perturbaciones	12
Características de la Respuesta	13
Conclusión	15
Bibliografía	16

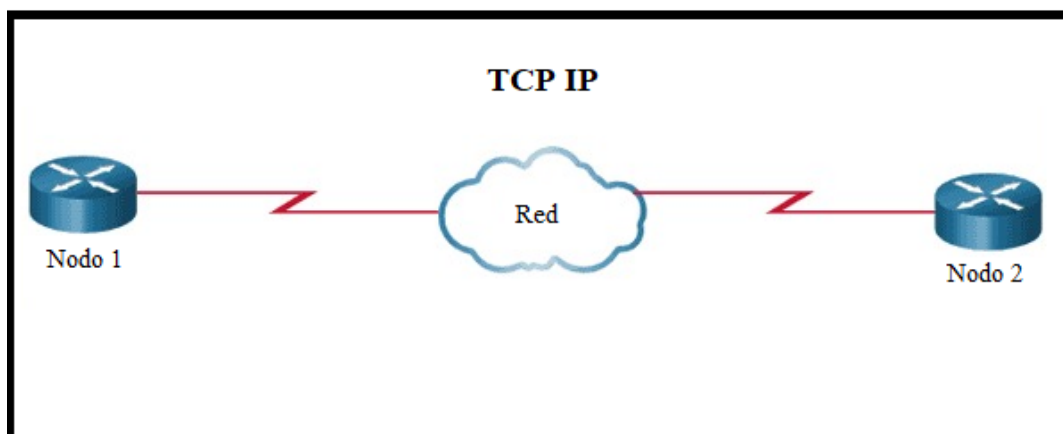
Introducción

En el ámbito de las redes de computadoras, uno de los principales desafíos es garantizar una comunicación eficiente y estable entre los distintos equipos conectados a través de Internet. La transmisión de datos se enfrenta constantemente a limitaciones de ancho de banda, variaciones en la demanda, retardos y pérdidas de paquetes, lo que puede afectar directamente la calidad del servicio y la experiencia de los usuarios.

El protocolo TCP (Transmission Control Protocol) incorpora un sistema de control de congestión que busca adaptar dinámicamente la velocidad de envío de datos en función de las condiciones actuales de la red. Este mecanismo permite mantener el flujo de información dentro de parámetros aceptables, evitando tanto la saturación de los enlaces como la infrautilización de los recursos disponibles.

El control de congestión de TCP puede ser interpretado como un sistema de control en lazo cerrado, en el cual las decisiones de transmisión dependen de la retroalimentación que provee la propia red, a partir de indicadores como la pérdida de paquetes o el tiempo de respuesta. De esta forma, el protocolo ajusta de manera continua la ventana de envío con el objetivo de maximizar el rendimiento sin comprometer la estabilidad del sistema.

El análisis de este sistema resulta de gran interés dentro de la Teoría de Control, ya que combina conceptos de estabilidad, error en estado estacionario, respuesta transitoria y robustez frente a perturbaciones, aplicados a un entorno real y masivo como lo es Internet. En este trabajo se estudiará la estructura del control de congestión de TCP y su funcionamiento general, identificando las variables relevantes y modelando su comportamiento desde la perspectiva de la ingeniería de control.



Objetivos

El objetivo de control que se quiere alcanzar es garantizar una transmisión de datos eficiente y estable en una conexión TCP, ajustando dinámicamente la ventana de congestión para adaptarse a las condiciones variables de la red.

De manera específica, se busca:

- Maximizar el aprovechamiento del ancho de banda disponible, evitando tanto la saturación de los enlaces como la infrautilización de la red.
- Mantener la estabilidad del flujo de datos, reduciendo el impacto de pérdidas de paquetes y variaciones en el retardo.
- Regular la tasa de transmisión de manera automática a través de la retroalimentación proporcionada por la red (ACKs, timeouts, variaciones en RTT).
- Asegurar la calidad de la comunicación entre los extremos de la conexión, logrando un equilibrio entre rendimiento y confiabilidad.

Alcance

Contexto

El sistema de transmisión de datos en redes de computadoras se basa en el uso del protocolo TCP, que constituye uno de los pilares fundamentales de Internet. Su función principal es asegurar la entrega confiable de información entre dos extremos de comunicación, organizando los datos en segmentos y confirmando su recepción.

En este trabajo se considera el caso de una única conexión TCP entre dos hosts de comunicación, en la cual el objetivo del sistema de control es ajustar dinámicamente la ventana de congestión para maximizar la cantidad de datos transmitidos de manera estable y confiable. Si bien el análisis se centra en una sola conexión, es importante destacar que la red es un entorno compartido: la presencia de otros usuarios, variaciones en el ancho de banda o errores de transmisión constituyen perturbaciones externas que influyen en el desempeño y forman parte del escenario real en el que opera el protocolo.

Puntos de interconexión con el mundo exterior

El sistema de control de congestión se encuentra en interacción constante con el entorno de red. Entre sus principales puntos de interconexión se destacan:

- Aplicaciones de usuario: Son las que generan el flujo de datos (por ejemplo, navegadores, sistemas de streaming o transferencias de archivos). Estas aplicaciones dependen directamente del rendimiento de TCP para ofrecer una experiencia de calidad.
- La red de comunicación: Incluye los enlaces físicos y lógicos, routers e infraestructuras intermedias que transportan los paquetes. Es en este medio donde aparecen las limitaciones de capacidad y las perturbaciones que afectan al sistema.
- El receptor de datos: Actúa como contraparte en la comunicación, enviando acuses de recibo (ACKs) que constituyen la principal forma de retroalimentación que utiliza el emisor para ajustar su ritmo de transmisión.

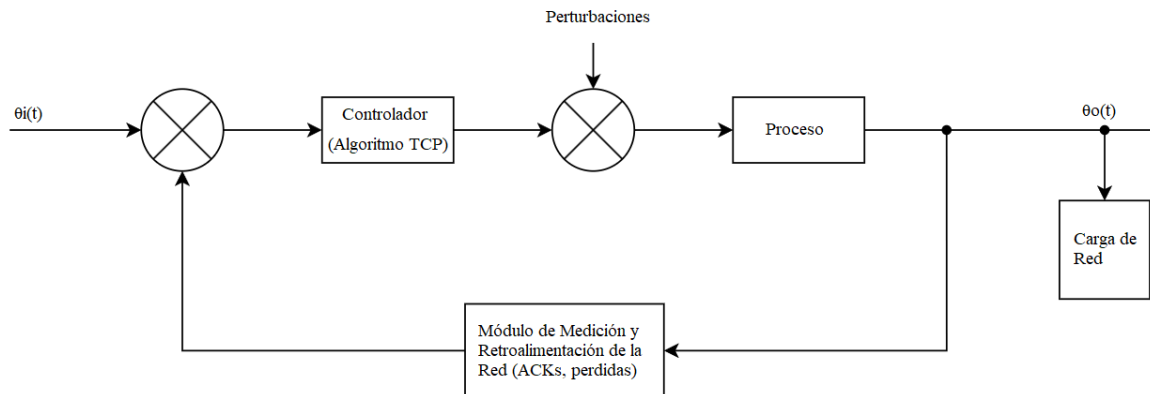
Estructura general del sistema

El sistema de control de congestión en TCP puede entenderse como un sistema de lazo cerrado. La variable de salida es el nivel de utilización de la red (que se refleja en indicadores como pérdidas de paquetes o tiempos de respuesta), mientras que la variable de entrada es la tasa de envío de datos determinada por la ventana de congestión.

La retroalimentación se obtiene a partir de señales implícitas del entorno, principalmente los ACKs que confirman la entrega correcta y, en casos adversos, la detección de pérdidas o retrasos excesivos. Estas señales permiten calcular el error respecto a un nivel de utilización deseado y, a partir de este, ajustar dinámicamente el ritmo de transmisión.

En este análisis, se consideran como perturbaciones externas factores tales como el tráfico de otros usuarios, la variabilidad del ancho de banda disponible, entre otros.

Diagrama de Bloques y Elementos del Sistema



El mecanismo de control de congestión de TCP Cubic puede interpretarse como un sistema de control en lazo cerrado, donde la variable manipulada es el tamaño de la ventana de congestión y la variable controlada es la tasa efectiva de transmisión o utilización de la red.

El objetivo del sistema es mantener un flujo de datos estable y eficiente, maximizando el uso del ancho de banda disponible sin provocar congestión.

Estructura del sistema de control

Entrada de referencia $\theta_i(t)$:

Representa la tasa de transmisión deseada o el nivel de utilización objetivo de la red. Este valor se asocia al rendimiento máximo posible del canal, sin superar el umbral que genera congestión.

Controlador (Algoritmo TCP Cubic):

Constituye el núcleo del sistema de control. Su función es ajustar la ventana de congestión $W(t)$ en función de la retroalimentación recibida desde la red.

TCP Cubic utiliza una ley de control basada en una función cúbica del tiempo desde el último evento de pérdida de paquetes:

$$W(t) = C * (t - K)^3 + W_{max}$$

Donde:

- C es una constante de crecimiento del sistema (típicamente $C=0.4$)
- t es el tiempo transcurrido desde la última pérdida,
- W_{max} es el tamaño máximo de la ventana alcanzado antes de la pérdida,
- $K = \sqrt[3]{\frac{W_{max} \cdot \beta}{C}}$

- β es el factor de reducción de la ventana (típicamente $\beta=0.7$).

Tipos de control:

El algoritmo TCP Cubic puede entenderse como un controlador que combina acciones proporcionales e integrales, aunque no incluye un componente derivativo.

La acción proporcional se refleja en la respuesta inmediata ante la congestión: cuando se detecta una pérdida de paquetes o una señal de congestión, CUBIC reduce la ventana de envío en una proporción del valor actual ($\beta \cdot W_{max}$). De esta forma, el sistema reacciona rápidamente para aliviar la carga sobre la red y evitar un colapso del enlace.

La acción integral aparece en el crecimiento gradual de la ventana a lo largo del tiempo. Mientras no se detecten pérdidas, el algoritmo aumenta $W(t)$ siguiendo su ley cúbica, acumulando el efecto del error entre la tasa de envío actual y la capacidad disponible del canal. Esto permite eliminar errores persistentes y alcanzar un equilibrio donde la red se utiliza de forma eficiente, sin congestión sostenida.

En cambio, Cubic no incluye un término derivativo, ya que las señales de retroalimentación (RTT, pérdidas, ACKs) son inherentemente ruidosas y variables. Un controlador derivativo amplificaría ese ruido y volvería inestable la respuesta. En su lugar, la propia función cúbica de crecimiento actúa como un mecanismo natural de amortiguación, suavizando los cambios sin necesidad de una acción derivativa explícita.

Proceso:

Representa la red de comunicación, incluyendo los enlaces, routers y buffers intermedios. Es la planta del sistema: su comportamiento depende de la latencia, capacidad de enlace y tráfico de otros usuarios. Las perturbaciones externas se introducen en este bloque e incluyen:

- Variaciones de ancho de banda.
- Retrasos variables (RTT).
- Pérdidas de paquetes.
- Tráfico cruzado.

Módulo de medición y retroalimentación de la red:

Es el componente que mide el estado del sistema. Se encarga de recolectar información mediante:

- ACKs (paquetes de confirmación) que indican una transmisión exitosa.
- Timeouts o duplicados de ACKs, que reflejan pérdidas o congestión.

Estos datos se utilizan para estimar el error entre la tasa deseada y la real, generando la señal de realimentación hacia el controlador TCP Cubic.

Error de control:

El error $e(t) = \theta_i(t) - \theta_o(t)$ representa la diferencia entre el rendimiento deseado y el

alcanzado.

Este error guía la corrección del controlador, ajustando la ventana de congestión para compensar los efectos de las perturbaciones.

Carga del Sistema

La carga del sistema se define como la cantidad total de tráfico que ingresa al enlace en cada instante de tiempo. Está compuesta por el flujo generado por nuestra propia conexión TCP (determinado por la ventana de congestión y el RTT). Esta carga total se compara con la capacidad del enlace; si la supera, se incrementa la ocupación del buffer, el RTT aumenta y pueden producirse pérdidas, afectando directamente la salida del sistema y la acción del controlador.

Características y Tipo de Error

El error a la salida de nuestro sistema se representa como una variación en el throughput efectivo alcanzado por la conexión TCP respecto del valor nominal esperado bajo condiciones normales de operación. Dado que el rendimiento de TCP depende principalmente del RTT, de la ventana de congestión y de la presencia o ausencia de pérdidas de paquetes, cualquier cambio en la carga del enlace provoca desviaciones en estas variables, lo que se traduce en un throughput menor o mayor al deseado. Estas variaciones afectan directamente el tiempo de transmisión de datos, incrementando la demora percibida por las aplicaciones y degradando la *Quality of Service*.

En este contexto, definimos el error como: $e(t) = T_d - T(t)$ donde T_d es el throughput deseado bajo condiciones nominales y $T(t)$ es el throughput efectivo. Si bien TCP CUBIC no calcula explícitamente esta diferencia, la incorpora de manera implícita a través de la realimentación provista por los ACKs: tiempos de llegada, variaciones en el RTT y ocurrencia de pérdidas funcionan como indicadores del desvío entre el rendimiento esperado y el real.

La realimentación del sistema está dada por los ACKs recibidos, los cuales contienen información indirecta sobre el estado del enlace. Un RTT creciente o la detección de pérdidas indican congestión y provocan que CUBIC reduzca la ventana de congestión, mientras que ACKs regulares y un RTT estable permiten que el algoritmo incremente la ventana siguiendo su ley cúbica. De esta manera, el controlador interpreta el comportamiento de la red como un mecanismo de realimentación negativa que lo guía hacia un régimen estable.

El rango del error en el que la salida puede considerarse admisible tomando como referencia variaciones del $\pm 10\%$ y $\pm 25\%$ respecto del throughput nominal, establecemos como zona aceptable de funcionamiento los intervalos: **$[T_d - 25\% ; T_d - 10\%]$ y $[T_d + 10\% ; T_d + 25\%]$.**

Para un throughput deseado de 6 Mbps, esto corresponde a los rangos [4.5 Mbps ; 5.4 Mbps] y [6.6 Mbps ; 7.5 Mbps]. Todo valor que se ubique por fuera de dichos límites será considerado una condición de falla. En particular, un throughput inferior a 4.5 Mbps indica congestión severa con reducción drástica de la ventana, mientras que valores superiores a 7.5 Mbps sugieren que el emisor está presionando en exceso el enlace, incrementando la probabilidad de pérdidas y generando inestabilidad en la transmisión.

En conjunto, la combinación de la señal de error $e(t)$ y los mecanismos de realimentación implícitos en TCP CUBIC determinan cómo el sistema ajusta dinámicamente su ventana de congestión $W(t)$ para adaptarse a las perturbaciones externas de la red, buscando restablecer el throughput dentro del rango admisible definido.

Variables que se desea controlar

La variable controlada principal es el **throughput efectivo** de la conexión TCP, es decir, la tasa de transmisión útil que logra el emisor en función del estado de la red.

La variable manipulada por el controlador es la **ventana de congestión $W(t)$** , que determina cuántos paquetes pueden enviarse antes de recibir ACKs.

El objetivo del sistema es que el throughput se mantenga dentro de un rango deseado, maximizando el uso del canal sin provocar congestión.

Tipos de unidades

- **Ventana de congestión $W(t)$:** *paquetes (pkts)*
- **Throughput:** *megabits por segundo (Mbps)*
- **RTT:** *segundos (s) o milisegundos (ms)*
- **Buffer:** *paquetes (pkts)*
- **Tasa de servicio μ :** *paquetes por segundo (pkts/s)*
- **Error de control:** *Mbps*
- **Tiempo:** *segundos (s)*

Amplificador de error

En TCP Cubic no existe un amplificador de error clásico como en un controlador PID, ya que la retroalimentación se basa en el RTT y las pérdidas. Sin embargo, en este análisis se introduce formalmente un error: **$e(t) = \text{throughput_deseado} - \text{throughput}(t)$** .

La ganancia del amplificador es unitaria ($K = 1$), ya que el controlador no escala explícitamente el error sino que actúa mediante su ley cúbica y los eventos de pérdida.

Por este motivo se considera un **amplificador de error implícito** con ganancia 1.

Estabilidad

La estabilidad de nuestro sistema se define como la capacidad del protocolo TCP CUBIC de mantener el throughput alrededor del valor objetivo especificado, con una tolerancia aproximada de $\pm 10\%$, conservando así un nivel de desempeño adecuado bajo condiciones de operación normales. A su vez, la estabilidad implica que el sistema sea capaz de retornar a su estado nominal luego de la aparición de perturbaciones, tales como variaciones en el RTT, pérdidas aleatorias o condiciones de congestión en el enlace.

Gracias a la dinámica propia del algoritmo CUBIC, el sistema presenta una respuesta que tiende a recuperar el throughput deseado después de cada evento de pérdida. Su crecimiento característico (lento cerca del máximo histórico y más acelerado cuando la ventana es pequeña) le permite adaptarse progresivamente a las fluctuaciones de la red y sostener un comportamiento estable durante la mayor parte del tiempo. De esta manera, cuando el enlace atraviesa variaciones moderadas en su retardo o presenta pérdidas aisladas, la conexión consigue volver a su nivel de operación esperado sin perder continuidad en la transmisión y maximizando el ancho de banda del canal.

Perturbaciones

Las posibles perturbaciones externas a las que puede estar sometido nuestro sistema son:

- Congestión súbita del enlace: Una acumulación repentina de tráfico en la red (ya sea por múltiples flujos TCP, transmisión intensiva de aplicaciones o picos inesperados en el uso del enlace) puede provocar una ocupación elevada del buffer, aumentando el RTT y generando pérdidas por overflow. Esto causa una disminución abrupta de la ventana de congestión y un deterioro temporal del throughput, alejando al sistema de su condición nominal.
- Pérdidas aleatorias en la red: La presencia de ruido, interferencias o fallos transitorios en el medio físico puede generar pérdidas no asociadas a congestión. Aunque sean independientes de la carga, estas pérdidas obligan a CUBIC a reducir su ventana de congestión según su mecanismo de respuesta, afectando temporalmente el rendimiento. La acumulación de pérdidas aleatorias puede impedir que el sistema alcance su throughput objetivo.
- Limitaciones temporales del ancho de banda: Cambios en las condiciones del enlace (como reasignación de capacidad, competencia con otros servicios o degradación momentánea del canal) pueden reducir la tasa máxima de transmisión disponible. Esto provoca que el throughput sea inferior al esperado y aumenta la probabilidad de pérdidas al intentar operar por encima de la capacidad efectiva.
- Degradación o fallas en el buffer del enlace: El desgaste de equipos de red, problemas en la memoria de los nodos intermedios o fallas intermitentes en los mecanismos de cola

pueden ocasionar comportamientos irregulares en la gestión de paquetes. Esto puede manifestarse en pérdidas inesperadas, variaciones abruptas en la ocupación del buffer y oscilaciones en el RTT, afectando negativamente el control de congestión y generando inconsistencias en la dinámica de la ventana.

Características de la Respuesta

Transitorio:

En nuestro sistema el estado transitorio se produce durante el proceso de crecimiento inicial de la ventana de congestión hasta alcanzar un valor de operación cercano al throughput objetivo. En los primeros instantes, la conexión parte de una ventana reducida, lo que limita la tasa de transmisión efectiva. A medida que avanza el tiempo, el algoritmo CUBIC incrementa gradualmente dicha ventana siguiendo su curva característica, lo que permite que el throughput vaya aumentando progresivamente hasta aproximarse al nivel nominal deseado.

Este incremento inicial no se da de manera instantánea, sino que se desarrolla de forma controlada debido al crecimiento más lento de CUBIC cuando la ventana se encuentra próxima al máximo anterior y más rápido cuando es pequeña. Esta dinámica genera un comportamiento equivalente al de un sistema sobreamortiguado, donde el aumento de la tasa de envío es estable pero relativamente lento. Como consecuencia, la conexión puede tardar varios segundos en alcanzar el rendimiento esperado, lo que representa un intervalo en el que el sistema aún no puede garantizar la Quality of Service requerida.

Una vez que el throughput se acerca al objetivo y la ventana alcanza un nivel adecuado respecto de la capacidad del enlace, la etapa transitoria finaliza y el comportamiento del sistema pasa a estar determinado principalmente por las variaciones en el estado de la red y por la propia acción del control de congestión del protocolo.

Estable:

Al alcanzarse el rendimiento nominal comienza el estado estable del sistema. Durante esta etapa, la respuesta presenta las siguientes características:

- Tiempo de respuesta:

Indica la velocidad con la que el sistema ajusta la ventana de congestión ante variaciones del retardo, pérdidas aleatorias o fluctuaciones en la carga del enlace. CUBIC reacciona reduciendo la ventana ante pérdidas y recuperándola gradualmente, lo que determina el tiempo necesario para volver al desempeño esperado.

- Oscilaciones:

Debido a la naturaleza del control de congestión, la ventana fluctúa continuamente alrededor de su valor nominal. Las pérdidas ocasionales producen reducciones abruptas, seguidas por incrementos controlados. Estas oscilaciones son normales dentro del rango de funcionamiento aceptable y no requieren intervención adicional del sistema.

- Precisión:

Frente a variaciones moderadas en el estado de la red, el algoritmo ajusta la ventana sin realizar cambios excesivos, evitando deteriorar el rendimiento. La forma cúbica de su crecimiento proporciona una recuperación suave y evita comportamientos demasiado agresivos ante pequeñas perturbaciones.

- Error en estado estable:

El sistema no presenta un error sostenido en estado estable. Si bien existen pequeñas desviaciones del throughput respecto del valor objetivo debido a las oscilaciones propias del algoritmo y del enlace, éstas permanecen dentro del rango admisible definido para el funcionamiento nominal y no comprometen la calidad del servicio.

Conclusión

A lo largo del desarrollo de este trabajo práctico pudimos analizar, modelar y simular un sistema de control de lazo cerrado aplicado al protocolo TCP, específicamente al comportamiento del algoritmo de control de congestión CUBIC. Esto nos permitió comprender en profundidad la importancia de la retroalimentación en redes de datos y el rol que cumple la teoría de control en la estabilidad y eficiencia del transporte confiable de información.

Optamos por estudiar CUBIC debido a su combinación de respuesta rápida y comportamiento estable frente a variaciones en la carga del enlace. La simulación nos permitió observar con claridad cómo actúan cada uno de los componentes del algoritmo. El mecanismo de reducción ante pérdidas asegura que la conexión responda de manera inmediata y proporcional cuando el enlace se congestiona, mientras que la etapa de crecimiento cúbico regula la recuperación de la ventana, suavizando las oscilaciones y proporcionando una mejor respuesta ante perturbaciones en el retardo o en la disponibilidad de ancho de banda.

El uso de umbrales en términos de throughput y variaciones aceptables de RTT nos brindó una mayor flexibilidad al definir la zona nominal de operación del sistema. En los enlaces de comunicación es habitual observar fluctuaciones en el retardo y pérdidas ocasionales, y considerar estos márgenes evita que la conexión opere de manera demasiado agresiva, preservando la estabilidad y reduciendo la probabilidad de colapso ante sobrecargas sostenidas.

Además, profundizamos en el funcionamiento de los modelos de red utilizados en la simulación, incluyendo la relación entre ventana de congestión, ocupación del buffer y capacidad efectiva del canal. Esto nos permitió validar los conceptos aprendidos durante la materia y comprender la importancia de las relaciones de solidaridad entre las variables involucradas, tales como throughput, RTT y probabilidad de pérdida. A partir de este análisis pudimos interpretar correctamente los resultados obtenidos y determinar las características del comportamiento dinámico del sistema.

Por otro lado, la simulación nos permitió comprender en detalle la evolución del error en estado estable. Aun bajo la presencia de perturbaciones, el sistema logró regularse y retornar a su funcionamiento nominal dentro del rango admisible, mostrando la eficacia del mecanismo de control de congestión para mantener la estabilidad del enlace. Sin la simulación hubiera sido imposible contrastar el comportamiento teórico con el desempeño real del modelo.

Como conclusión final, la implementación y análisis del sistema de control de lazo cerrado basado en TCP CUBIC permitió completar satisfactoriamente los objetivos planteados. El estudio del protocolo desde la óptica de la teoría de control nos brindó una comprensión más profunda de los mecanismos que aseguran la estabilidad y eficiencia en la transmisión de datos en redes modernas. Este enfoque no solo resulta fundamental para optimizar el desempeño de los sistemas de comunicación, sino también para garantizar una experiencia de usuario consistente en aplicaciones que dependen del transporte

confiable de información. En definitiva, la teoría de control aplicada a protocolos como TCP continúa siendo una herramienta central para el diseño eficiente y robusto de infraestructuras de red.

Bibliografía

- Control congestion TCP: https://en.wikipedia.org/wiki/TCP_congestion_control
- Control congestion TCP: <https://book.systemsapproach.org/congestion/tcpcc.html>
- TCP Cubic: https://en.wikipedia.org/wiki/CUBIC_TCP
- TCP Cubic: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8312>