



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA - CONTROL

CONTROL SOBRE REDES CON BASE EN
FRECUENCIAS DE TRANSMISIÓN

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JARED ARTURO ROJAS VARGAS

TUTOR PRINCIPAL
HÉCTOR BENÍTEZ PÉREZ - IIMAS

MÉXICO, D.F. ENERO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. LUIS AGUSTÍN ÁLVAREZ-ICAZA LONGORIA

Secretario: Dra. MARÍA CRISTINA VERDE RODARTE

Vocal: Dr. HÉCTOR BENÍTEZ PÉREZ

1er. Suplente: Dr. PAUL ROLANDO MAYA ORTÍZ

2o. Suplente: Dr. JORGE LUIS ORTEGA ARJONA

Lugar donde se realizó la tesis: IIMAS

TUTOR DE TESIS:

Dr. HÉCTOR BENÍTEZ PÉREZ

FIRMA

Agradecimientos

Mis agradecimientos van a las personas importantes en mi vida y las que contribuyeron o influyeron para lograr este trabajo:

Primeramente al dador de la vida YHWH.

A mi familia, mis padres Jorge y María de los Ángeles, mis hermanos Jezreel y Eder y a mi tío Raúl por su apoyo en los momentos difíciles que pasamos.

Para el Colegio de Control de la UNAM por su enseñanza y al respetable jurado por compartir sus consejos y comentarios atinados para la realización de este trabajo de tesis. En especial a mi tutor el Dr. Héctor Benítez por su guía, respaldo, estímulo y la confianza que depositó en mí para no desistir.

Mis amigos del IIMAS en especial al Dr. Oscar Esquivel, por compartir sus conocimientos y asistirme oportunamente.

A Pilar Vallejo que siempre me alentó a seguir adelante para alcanzar mis metas.

Y finalmente a la BBC: César, Alonso, Uriel, Manuel, Miguel, Adrián, Rafael, Daniel, Úrsula, Carla y Luis por su ayuda, amistad y el espíritu de compañerismo mostrado y por haber hecho ameno y agradable la estancia en el posgrado.

Índice general

1. Introducción	6
1.1. Objetivo	9
1.2. Alcances	9
1.3. Logros	9
1.4. Contribución	9
1.5. Metodología	10
1.6. Estructura de la tesis	10
2. Antecedentes	12
2.1. Sistemas de Tiempo Real	15
2.2. Planificación	18
2.3. Redes de comunicación	23
2.3.1. Ethernet (CSMA/CD)	25
2.3.2. DeviceNet (CAN Bus)	28
2.3.3. ControlNet (Token-Passing-Bus-Based)	30
2.4. Resumen	34
3. Estado del Arte	35
3.1. Protocolos y Algoritmos de Planificación de Red	37
3.2. Resumen	41
4. Modelo de Red	42
4.1. Región de planificabilidad	43
4.2. Modelo de frecuencias de transmisión	46
4.3. Resumen	50

5. Caso de Estudio	51
5.1. Sistemas de Control Helicóptero y Levitador Magnético en Red Ethernet	58
5.2. Resumen	61
6. Resultados	63
6.1. Sistema Lineal de frecuencias de transmisión	63
6.1.1. Controlador y Filtro de Kalman	64
6.2. Región de planificabilidad	66
6.3. Helicóptero y Levitador Magnético	67
6.4. Control sobre red Ethernet	69
6.5. Resumen	79
7. Conclusiones	80
Anexos	82
Bibliografía	89

Capítulo 1

Introducción

En los sistemas de control modernos, la planta física, el controlador, los sensores y actuadores son difíciles de ubicar en distancias cortas, de ahí que esos componentes necesiten estar conectados mediante una red de comunicación. Cuando un sistema de control por realimentación es cerrado a través de una red de comunicación, entonces es llamado sistema de control en red (NCS, por su nombre en inglés Network Control System). Ejemplos de estos sistemas se encuentran en varias áreas como: la industria automotriz [7], teleoperación de robots [9], sistemas de fabricación automatizados [10] y vehículos aéreos no tripulados [8], por mencionar algunas. Los NCS han atraído mucha atención debido a ventajas significativas, tales como la reducción del costo de la instalación y mantenimiento, fácil diagnóstico y el aumento de la agilidad del sistema entre otras [11].

La idea de un sistema de control en red es usar redes de comunicación serial para intercambiar información del sistema y señales de control entre los diversos componentes físicos (nodos de red) que pueden estar distribuidos físicamente [12], por lo tanto el objetivo principal de las redes de control es transportar un sinnúmero de paquetes pequeños, pero frecuentes, entre un conjunto de nodos relativamente grande [13], [34].

Cuando se diseña en NCS se debe de tener en cuenta una nueva restricción, el ancho de banda limitado de la red de comunicación. Hay cuatro factores que afectan la utilización y disponibilidad del ancho de banda de la red [14]:

- las tasas de muestreo a las que los diversos dispositivos envían información a

través de la red

- el número de elementos que requieren operación síncrona
- los datos o el tamaño de mensaje de la información
- el protocolo de subcapa MAC que controla la transmisión de información

Los indicadores de desempeño de los sistemas de control en red que impactan en los requerimientos de los sistemas de control en red incluyen retardo de acceso, *tiempo de transmisión*, tiempo de respuesta, retardo de mensaje, *colisiones de mensajes* (porcentaje de colisiones), rendimiento de mensajes (porcentaje de paquetes descartados), tamaño del paquete, *utilización de la red* y los límites del determinismo [15].

Las redes candidatas para sistemas de control generalmente deben cumplir dos criterios principales: retardo de tiempo acotado y transmisión garantizada. La transmisión no exitosa o el largo tiempo de retardo de mensajes de un sensor a un actuador, por ejemplo, puede deteriorar el desempeño del sistema o hacer el sistema inestable.

Se han propuesto varios protocolos para cumplir con estos requisitos para los sistemas de control. Estos incluyen Ethernet (IEEE 802.3:CSMA/CD), token bus (IEEE 802.4), token ring (IEEE 802.5) y CAN (CSMA/AMP). Las redes de control se basan normalmente en uno de los dos protocolos de acceso al medio: CAN, usado para sistemas distribuidos inteligentes (SDS, por su nombre en inglés Smart Distributed System), DeviceNet y CAN Kingdom; y token ring y token bus (PROFIBUS), protocolo de automatización de la producción, ControlNet de fibra de interface de datos distribuidos (FDDI).

Con la disminución de los precios, aumento de la velocidad, usos generalizados, numerosos programas y aplicaciones, e infraestructura bien establecida, estas redes se convierten en los mayores competidores en las redes industriales para aplicaciones de control [17].

Para responder adecuadamente a las necesidades de comunicación para aplicaciones de tiempo real o de control distribuido, donde los datos a transportar se encuentran bajo restricciones de tiempo precisos, las redes deben ofrecer servicios de comunicación de tiempo limitados y usar protocolos capaces de manejar tales restricciones [1].

Por lo tanto se requiere un protocolo de red que utilice un esquema de tiempo real determinista de arbitraje de acceso, que permita a los usuarios saber previamente si los datos transmitidos cumplirán con sus restricciones de tiempo [2], [3]

Ethernet es una red de propósito general que proporciona formato de datos unificados y reduce la complejidad de instalación y mantenimiento, que en los últimos años se ha hecho muy popular en el área de comunicaciones industriales y que parece convertirse en un estándar industrial en un futuro cercano [68].

Sin embargo Ethernet es un protocolo no determinista y no soporta la priorización de paquetes. A altas cargas de red, las colisiones de mensajes son el mayor problema, debido a que afectan en gran medida la transferencia de datos y producen retardos de tiempo, que pueden ser no acotados. Ethernet captura el efecto existente en el algoritmo estándar BEB, en el que un nodo exclusivamente transmite paquetes por un tiempo prolongado a pesar de que otros nodos esperen el acceso al medio, causando degradación en el desempeño. Basado en el algoritmo BEB, un paquete puede ser descartado después de una serie de colisiones, además, la comunicación de extremo a extremo no es garantizada.

Para emplear este tipo de redes debe haber un mecanismo que asegure que todos los nodos participantes tendrán acceso “equitativo” por lo que es necesario realizar una *planificación de red* en los NCSs, esto es asignar una transmisión programada para cada entidad en la red de comunicación basado en un algoritmo de planificación. En sistemas de control, es importante establecer prioridades a fin de asegurarse de que las actividades más críticas obtengan preferencia.

En este trabajo de tesis se propone una estrategia de control sobre redes basada en la modificación de las frecuencias de transmisión entre nodos de un sistema de control para disminuir la carga en la red con lo que se logra reducir significativamente las colisiones. Con esta estrategia es posible emplear una red como Ethernet que no es conveniente para la comunicación de los sistemas de control en red y, aún así, mantener la estabilidad de los mismos.

Así mismo se realiza la validación utilizando como sistemas de control un helicóptero de dos grados de libertad y un levitador magnético y como medio de comunicación una red Ethernet.

1.1. Objetivo

Se tiene como objetivo desarrollar una estrategia de control sobre redes basada en el cambio de frecuencias de transmisión entre nodos de un sistema de control en red con el propósito de reducir la carga de la red y evitar las colisiones de mensajes. De esta manera se puede emplear para la comunicación una red Ethernet, que hoy en día se ha hecho atractiva para su uso pero no es adecuada para los sistemas de control en red y a pesar de esto mantener el rendimiento de los sistemas de control.

1.2. Alcances

Con la estrategia propuesta para el envío de datos de los NCS's, se garantiza el menor número de colisiones en cualquier arquitectura de red existente utilizada para sistemas de control en red, incluso en la red Ethernet. Además es posible mantener el rendimiento de los sistemas de control cumpliendo la restricción de utilización modificando las frecuencias de transmisión de los nodos de red.

1.3. Logros

Se realiza la validación de la técnica en una arquitectura de red Ethernet de 10 *Mbps* para dos sistemas de control en red un helicóptero de 2 grados de libertad y un levitador magnético ambos de Quanser considerando un escenario que se presenta normalmente que es el tráfico en la red, en donde Ethernet presenta las mayores desventajas y además se realiza la modificación de las frecuencias de transmisión para llevarlas a una zona donde se puede realizar la planificación cumpliendo la restricción de utilización de la red.

1.4. Contribución

La principal contribución es la estrategia para el control sobre redes basada en la modificación de las frecuencias de transmisión de los nodos y el modelado de un sistema lineal que describe el efecto que tiene en los demás nodos la variación de la

frecuencia de transmisión de cada nodo en una red compartida.

1.5. Metodología

Primeramente se establece una región dentro de la cual es posible modificar las frecuencias de transmisión teniendo en cuenta el compromiso que conlleva la relación integral entre los parámetros de control y red. Se calcula el límite superior e inferior de dicha región tomando como índice de desempeño el error integral absoluto de los sistemas de control en red.

Se modelan las frecuencias de transmisión de los nodos de los sistemas distribuidos como un sistema lineal en donde cada estado representa la frecuencia de un nodo de la red de comunicación y para variar o modificar las frecuencias de transmisión se diseña un controlador LQR.

1.6. Estructura de la tesis

El resto del contenido de la tesis se divide como sigue:

Capítulo 2: Antecedentes

Este capítulo da una breve revisión de las definiciones y elementos relacionados con los sistemas de control en red. Y concluye con la formulación del problema abordado en este trabajo.

Capítulo 3: Estado del Arte

Se revisan algunos trabajos que se han hecho relacionados principalmente con planificación y control sobre redes.

Capítulo 4: Modelo de red

Las frecuencias de transmisión de los nodos de red y el efecto que tiene la modificación de la frecuencia de uno de ellos con respecto a los demás en el medio

compartido y limitado que es el ancho de banda de la red, es modelado como un sistema lineal invariante en el tiempo.

Se calcula una región donde es posible modificar la frecuencias de transmisión sin afectar la estabilidad de los sistemas de control en red y se cumple la restricción de planificación.

Capítulo 5: Caso de estudio

La validación de la técnica propuesta se realiza utilizando como sistemas distribuidos un levitador magnético y un helicóptero de 2 grados de libertad comunicados en una red Ethernet.

Capítulo 6: Resultados

Este capítulo presenta los resultados de los experimentos realizados en dos escenarios que se presentan comúnmente como es el tráfico de red y la necesidad de la planificación de la red.

Capítulo 7: Conclusiones

Finalmente se presentan las conclusiones de esta tesis y se discute el trabajo futuro.

Capítulo 2

Antecedentes

Una importante tendencia en el área de investigación y aplicaciones de control es integrar algunos dispositivos como sensor, actuador y control distribuidos geográficamente a través de redes de comunicación para conseguir sensado, computación y ejecución y toma de decisiones a alto nivel [4],[5],[6]. Dicha área recibe el nombre de sistemas de control en red (NCS por su nombre en inglés Networked Control System).

De las definiciones que se han dado a los sistemas de control en red se destacan las siguientes:

Cuando en un sistema de control tradicional el lazo se cierra vía un canal de comunicación (tal como una red); el cual puede ser compartido con otros nodos ajenos al sistema de control, entonces se dice que el sistema de control es un Sistema de Control en Red [26].

Un sistema de control comunicado con sensores y actuadores sobre una red de comunicación será llamado un sistema de control distribuido de tiempo real [25].

Los sistemas de control en red son sistemas distribuidos espacialmente en los que la comunicación entre sensores, actuadores y controladores ocurre a través de una red de comunicación digital compartida de banda limitada [11].

Los sistemas de control de retroalimentación donde los lazos de control son cerrados a través de una red de comunicación son referidos como sistemas de control distribuidos. Son distribuidos en el sentido de que los sensores, actuadores y controladores (referidos como “nodos”) se comunican vía una red de transmisión de datos compartida [19].

El funcionamiento de los sistemas de control en red se puede explicar de manera sencilla de la siguiente manera [16]:

En un NCS los sensores generan una corriente de datos detectados y se comunican a través de una red a los controladores. Los controladores procesan los datos de las muestras de los datos detectados y generan señales de control apropiadas para ser entregadas a través de la red a los actuadores. Los actuadores transforman las señales de control en acciones que afectan el mundo físico.

Las actividades en el área de sistemas conectados en red se pueden clasificar en tres grandes campos [18]:

1. Control de redes
2. Control sobre redes
3. Sistemas multiagentes

Control de redes está relacionado principalmente con proveer un cierto nivel de rendimiento a un flujo de datos de red, mientras que se logra una utilización eficiente y equitativa de los recursos de red.

Es el estudio e investigación en comunicaciones y redes para hacerlas más adecuadas para sistemas de control distribuidos de tiempo real, por ejemplo control de enrutamiento, protocolos de tiempo real, reducción de congestión, codiseño de redes y controladores [19].

Control sobre redes trata con el diseño de retroalimentación adaptados a los sistemas de control en los que los datos de control se intercambian a través de enlaces de comunicación poco confiables.

Es el desarrollo de estrategias de control y diseño de sistemas de control sobre la red para minimizar el efecto de los parámetros adversos sobre el desempeño de los sistemas distribuidos, tales como retardos de red [19].

Sistemas Multiagentes se ocupa del estudio de la arquitectura de red y las interacciones entre sus componentes que influyen en los objetivos de control global. Precisamente, el problema es entender cómo las leyes locales que describen el comportamiento de los agentes individuales influyen en el comportamiento global del sistema en red.

Existen dos configuraciones de NCS [20]:

La estructura Directa. Se compone de un controlador y un sistema remoto que consiste en la planta física, los sensores y actuadores. El controlador y la planta están físicamente situados en diferentes lugares y son directamente vinculados por una red de comunicación a fin de realizar el control de lazo cerrado remoto (Figura 2).

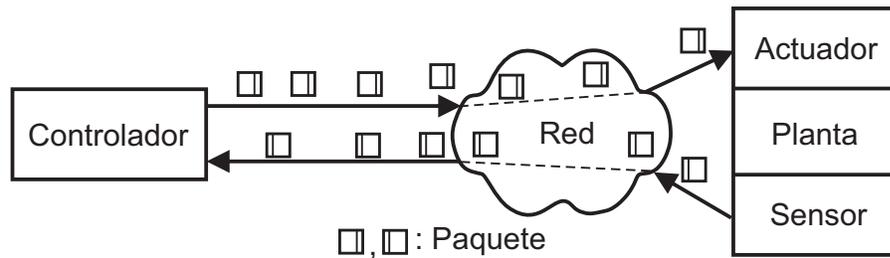


Figura 2.1: NCS en estructura directa

La estructura Jerárquica. La base de la estructura jerárquica consiste de un controlador principal y un sistema remoto en lazo cerrado (Figura 2.2).

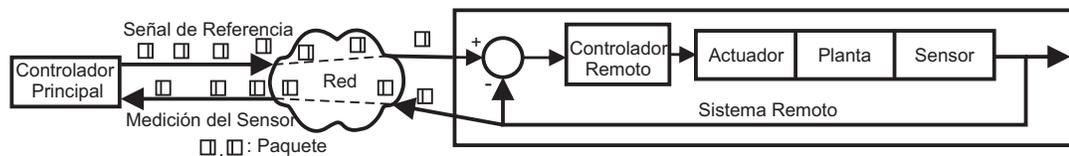


Figura 2.2: NCS en estructura jerárquica

En las definiciones de NCSs dadas al inicio de esta sección se nota el uso de conceptos como *tiempo real*, *red de comunicación* y *transmisión*. De modo que la investigación de los NCSs implica el trabajo conjunto de diferentes áreas, que de hecho, se resumen en tres: Sistemas de Control, redes de comunicación y teoría de la información, y ciencia de la computación [27]. Por lo tanto es necesario conocer algunas definiciones y conceptos relacionados con estas áreas.

2.1. Sistemas de Tiempo Real

Los sistemas de tiempo real son sistemas de cómputo que deben reaccionar dentro de restricciones de tiempo a eventos en el medio ambiente. Por lo tanto, el correcto funcionamiento de estos sistemas no depende únicamente de la precisión lógica de su cálculo, sino también del tiempo en el cual tal resultado esté disponible [28]. A nivel de proceso, se caracteriza por un *plazo*, el cual es el máximo tiempo en el cual debe completar la ejecución por tarea.

Conviene utilizar una definición más general como la propuesta en [29], donde se define como un sistema que responde a estímulos generados externamente dentro de un periodo de tiempo finito y especificado.

Un sistema de tiempo real eficiente produce resultados correctos al tiempo apropiado. Los sistemas de tiempo real pueden ser clasificados en sistemas de tiempo real duros y sistemas de tiempo real suaves. El sistema en el cual conocer todos los requerimientos de tiempo es obligatorio es conocido como sistema de tiempo real duro. En un sistema de tiempo real suave, se requiere que casi todos los requerimientos de tiempo se cumplan [30].

Cada unidad de trabajo que es programada y ejecutada por el sistema es llamada *instancia* y un conjunto de instancias relacionadas que en conjunto proporcionan alguna función de sistema es una *tarea*. Así que por ejemplo el cálculo que es ejecutado por un CPU o la transmisión de un paquete de datos será una instancia. Los recursos donde se ejecuta una instancia ya sea un CPU o una red de comunicación son llamados *procesadores*.

Hay dos parámetros que principalmente distinguen a las tareas en los sistemas de tiempo real, el *tiempo de liberación* y el *plazo*. El tiempo de liberación de una tarea es el instante de tiempo en el cual se vuelve disponible para su ejecución y el plazo de una tarea es el instante de tiempo para el cual es requerido que su ejecución sea completada.

En aplicaciones críticas, un resultado producido después del plazo no es únicamente tardío, sino erróneo. Dependiendo de las consecuencias que puedan ocurrir debido al incumplimiento de un plazo, una tarea de tiempo real se puede clasificar en:

- **Duras.** Una tarea de tiempo real se dice que es dura si los resultados producidos

después de su plazo pueden causar consecuencias catastróficas en el sistema bajo control

- **Suaves.** Una tarea de tiempo real se dice que es suave si los resultados producidos después de su plazo tienen alguna utilidad para el sistema, aunque causen una degradación del rendimiento

En general, en NCS los datos de transmisión T_i con periodo h_i pueden ser caracterizados por los siguientes parámetros [23]:

- **Tiempo de llegada, a_i :** el tiempo al cual un paquete de red que contiene los datos del sensor ha sido construido, colocado en cola de transmisión, y está listo para la transmisión. Normalmente, es el inicio de cada periodo de transmisión.
- **Tiempo de inicio, s_i :** el tiempo en el que comienza una transmisión
- **Tiempo de bloqueo, b_i :** el tiempo que toma esperar para que la transmisión inicie después de que llega, es decir, $b_i = s_i - a_i$.
- **Tiempo de transmisión, c_i :** el tiempo que toma para enviar el paquete de red de la fuente a su destino a través de la red. Es decidido normalmente por la longitud y tasa de bits de la red física.
- **Tiempo de finalización, f_i :** el tiempo en el que una transmisión finaliza
- **Retardo de transmisión, τ_i :** el tiempo entre cuando un paquete llega y cuando un paquete de transmisión es finalizado. Por lo tanto, $\tau_i = f_i - a_i$ o $\tau_i = b_i + c_i$
- **Plazo límite, d_i :** el tiempo al cual una transmisión debe ser completada para evitar la degradación del rendimiento del sistema

Los parámetros anteriores son utilizados cuando se habla de planificación de sistemas de control en red y algunos de ellos se ejemplifican en la Figura 2.3.

Resulta lógico que los parámetros o restricciones de un NCS de tiempo real sean similares a los de un sistema de cómputo de tiempo real duro, que se pueden consultar para un estudio más detallado en [21]. Sin embargo, en el caso de NCS el recurso

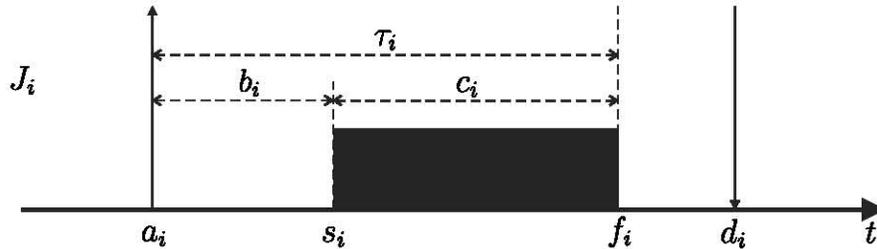


Figura 2.3: Parámetros de una tarea de transmisión de red de tiempo real

compartido es la red en lugar del procesador del CPU y la ejecución de una tarea de tiempo real será la transmisión de un paquete de datos.

En la siguiente tabla se resume la analogía entre ambos sistemas y será útil tenerla en cuenta para extender los conceptos de planificación de CPU en sistemas de cómputo a planificación de Red en NCS.

	Planificación de la Red	Planificación del CPU
<i>tarea</i>	paquete de transmisión	ejecución de tareas
h_i	periodo de transmisión	periodo de tarea
c_i	tiempo de transmisión	tiempo de cómputo
f_i	tiempo de finalización	tiempo de finalización
d_i	plazo de transmisión	plazo de tarea
U	utilización de la red	utilización del CPU

Tabla 2.1: Analogía entre planificación de CPU y Red

Cabe mencionar que las transmisiones de red son normalmente no expulsables, es decir, una transmisión una vez iniciada, es llevada a cabo hasta su finalización. Una transmisión de paquete en curso no puede ser interrumpida debido a una nueva solicitud de transmisión recién llegada.

El concepto de utilización de la red puede deducirse de la definición de **factor de utilización del procesador** de [22]. Dado un conjunto Γ de n tareas periódicas,

el factor de utilización del procesador U es la fracción de tiempo que el procesador gasta en la ejecución del conjunto de tareas. Ya que c_i/h_i es la fracción de tiempo que el procesador gasta en ejecutar la tarea τ_i , el factor de utilización para n tareas está dado por:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{h_i} \quad (2.1)$$

2.2. Planificación

La disponibilidad de tiempo en una red de comunicación compartida para la comunicación entre los sensores, el controlador, y los actuadores es un factor limitante importante en el desempeño de un NCS. Por lo tanto en NCSs, el desempeño de los lazos de control no depende únicamente del diseño de los algoritmos de control, sino también de la planificación de los recursos compartidos de red.

El problema de planificación de red en los NCSs es asignar una transmisión programada para cada entidad de transmisión en la red de comunicación basado en un algoritmo de planificación. *Un algoritmo de planificación* es el conjunto de reglas que, en cualquier tiempo, determina el orden en el cual las tareas (transmisiones) son ejecutadas [21]. Una entidad de transmisión puede ser por ejemplo un sensor o un conjunto de sensores de una planta. En [24] se define planificador como un módulo que asigna los procesadores y recursos necesarios para tareas.

Por lo tanto, se puede decir que la planificación de red en un NCS es sobre decidir quien transmite y cuándo y con qué prioridad para evitar una colisión ocasionada por la transmisión simultánea de dos o más entidades.

Generalmente hablando, la planificación de sistemas de control en red es similar al problema de planificación de CPU en sistemas de cómputo de tiempo real duro, donde un conjunto de tareas concurrentes de CPU son ejecutadas en un solo CPU con restricciones de tiempo.

Por lo tanto una definición más formal es que dado un conjunto de tareas, $J = \{J_1, \dots, J_n\}$, un *planificador* es una asignación de tareas al procesador, para que cada tarea sea ejecutada hasta su finalización. Un planificador puede ser definido como una función $\sigma : R^+ \rightarrow N$ tal que $\forall t \in R^+, \exists t_1, t_2$ tal que $t \in [t_1, t_2)$ y $\forall t' \in [t_1, t_2) \sigma(t) =$

$\sigma(t)$. En otras palabras, $\sigma(t)$ es una función escalón entera y $\sigma(t) = k$, con $k > 0$, significa que la tarea J_k está en ejecución al tiempo t , mientras $\sigma(t) = 0$ significa que el CPU está sin utilizar. La Figura 2.4 muestra un ejemplo de planificación obtenido para la ejecución de tres tareas: J_1, J_2, J_3 [21].

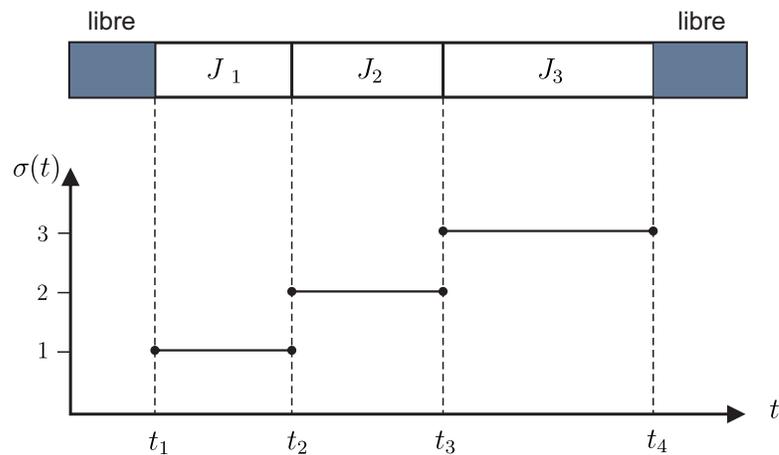


Figura 2.4: Planificación obtenida para ejecutar tres tareas J_1, J_2, J_3 .

- En los tiempos t_1, t_2, t_3 y t_4 el procesador realiza un *cambio de contexto*
- Cada intervalo $[t_i, t_{i+1})$ en el cual $\sigma(t)$ es constante es llamado segmento de tiempo. El intervalo $[x, y)$ identifica todos los valores de t tal que $x \leq t < y$.
- Una planificación *por orden de prioridad* es aquella en la que las tareas en ejecución pueden ser arbitrariamente suspendidas en cualquier tiempo, para asignar el CPU a otra tarea conforme a la política de planificación predefinida. En esta clase de planificación, las tareas pueden ser ejecutadas en intervalos de tiempo disjuntos.
- Una planificación se dice que es *factible* si todas las tareas pueden ser completadas de acuerdo a un conjunto de restricciones específicas.
- Un conjunto de tareas se dice que es *planificable* si existe al menos un algoritmo que pueda producir una planificación factible

Un ejemplo de planificación por orden de prioridad se muestra en la Figura 2.5:

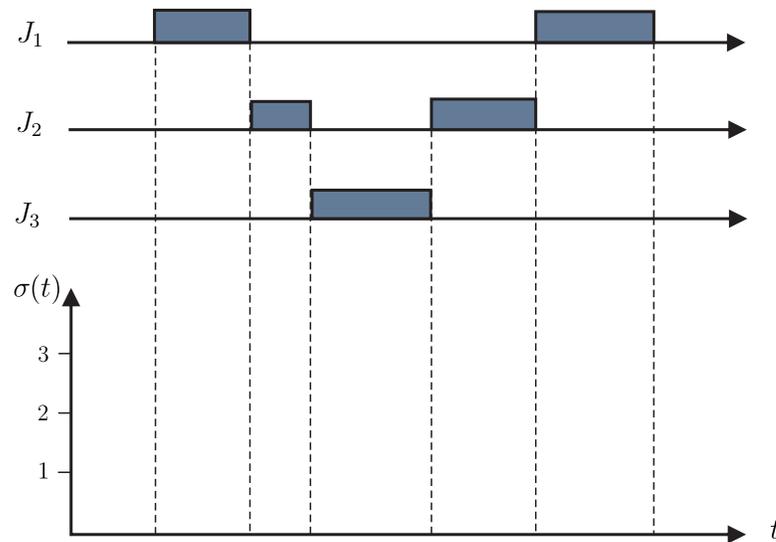


Figura 2.5: Ejemplo de planificación por orden de prioridad

Para solucionar los accesos simultáneos a la red, la transmisión de los datos de cada planta debe ser planificada (y priorizada), *estática* o *dinámica*. En la planificación estática, el algoritmo de planificación tiene completo conocimiento del conjunto de tareas y sus restricciones, tales como plazos, restricciones de precedencia, y tiempos futuros de liberación. En la planificación dinámica, sin embargo, el algoritmo de planificación no tiene conocimiento completo del conjunto de tareas y sus restricciones de tiempo [32].

Existe una gran variedad de algoritmos propuestos para la planificación de tareas de tiempo real además de los ya mencionados arriba, los cuales se clasifican principalmente en:

- *Con expulsión*: Las tareas en ejecución pueden ser interrumpidas en cualquier momento para asignar el procesador a otra tarea activa, según una política de planificación predefinida.
- *Sin expulsión*: Una tarea iniciada es ejecutada por el procesador hasta su finalización. En este caso todas las decisiones de planificación se toman una vez

que una tarea finaliza su ejecución.

- *En línea:* Si las decisiones de planificación se toman en tiempo de ejecución cada vez que una nueva tarea entra en el sistema o cuando termina una tarea en ejecución.
- *Fuera de línea:* Si es ejecutada sobre el conjunto total de tareas antes de la activación de tareas. La planificación generada de esta forma se almacena en una tabla y posteriormente se ejecuta por un despachador.
- *Óptimo:* Si minimiza alguna función de costo definida sobre el conjunto de tareas. Cuando no existe tal función y el objetivo es lograr una planificación factible, entonces un algoritmo se dice factible (subóptimo) si al utilizarlo siempre se encuentra tal planificación.
- *Heurístico:* Si sigue reglas ad-hoc para proponer una planificación

Recientemente, la clasificación de los algoritmos de planificación se agrupa principalmente en:

- Un planificador *estático (fuera de línea)*. Requiere que la información completa acerca del problema de planificación (número de tareas, plazos, prioridades, periodos, etc.) sea conocida *a priori* pero con la implementación en línea, es decir, la configuración es cambiada en tiempo de ejecución; con ello el problema de planificación puede ser resuelto antes que el planificador sea ejecutado.
- Un planificador es dinámico (en línea) si en tiempo de ejecución es viable conocer los parámetros de planificación y realizar los cambios de configuración.

Muchos algoritmos de planificación se basan en el *modelo de tareas periódicas*, en este modelo cada cálculo o dato de transmisión es ejecutado repetidamente en un intervalo de tiempo regular o semiregular. Con el fin de encontrar una función del sistema de manera continua, se modela como un periodo de tarea. Específicamente cada tarea periódica, denotada por T_i es una secuencia de instancias. El periodo p_i de la tarea periódica T_i es la longitud mínima de todos los intervalos de tiempo entre

los tiempos de liberación de instancias consecutivas en T_i . Su tiempo de ejecución es el máximo tiempo de ejecución de todas las instancias en él.

Un concepto utilizado en planificación de tareas periódicas es el *Hiperperiodo* y se define en [21] como el mínimo intervalo de tiempo después del cual el programa se repite. Para un conjunto de tareas periódicas sincronizadamente activadas en el tiempo $t = 0$, el hiperperiodo está dado por el mínimo común múltiplo de los periodos:

$$H = lcm(T_1, \dots, T_n)$$

en ocasiones también será llamado Macro ciclo [63]

Entre los algoritmos de planificación más usados que manejan las tareas periódicas está el Rate Monotonic (RM) y el Earliest Deadline First (EDF). De acuerdo con el RM, a las tareas se asignan prioridades fijas ordenadas, la tarea con el periodo más corto recibe la prioridad más grande. Mientras que con el EDF, las prioridades se asignan dinámicamente y son inversamente proporcionales a los plazos absolutos de los tareas activas. [33]

Las condiciones básicas de planificabilidad por RM y EDF propuestas en [22] fueron derivadas para un conjunto Γ de n tareas periódicas bajo la suposición de que todas las tareas comienzan simultáneamente en el tiempo $t = 0$, los plazos relativos son igual a sus periodos y las tareas son independientes (esto es, ellas no tienen restricciones de recursos, ni relaciones de precedencia). Bajo esas consideraciones, un conjunto de n tareas periódicas es planificable por el algoritmo RM si [22]

$$\sum_{i=1}^n U_i \leq (2^{1/n} - 1) \quad (2.2)$$

Bajo las mismas consideraciones, un conjunto de n tareas periódicas es planificable por el algoritmo EDF si y sólo si [22]

$$\sum_{i=1}^n U_i \leq 1 \quad (2.3)$$

2.3. Redes de comunicación

Escoger una red de control es esencial para un diseño de un sistema de control en red. Las redes de control tienen las siguientes características [30]:

- La mayoría de la comunicación entre los controladores y actuadores/sensores tiene periodo de muestreo fijo y los datos son transmitidos continuamente, por lo que la tasa de transmisión es alta.
- El tamaño de los datos de cada mensaje es relativamente corto.
- El requisito de tiempo real es crítico

Para sistemas de control, las redes de control candidatas generalmente deben cumplir dos criterios principales: retardos de tiempo acotados y transmisión garantizada; esto es, un mensaje debe ser transmitido satisfactoriamente dentro de un retardo de tiempo acotado. La transmisión no exitosa o mensajes con largos retardos de tiempo de un sensor a un actuador por ejemplo, pueden deteriorar el desempeño del sistema o hacer el sistema inestable [34].

Es decir, si un mensaje no es entregado satisfactoriamente a un actuador, éste tendría que esperar al siguiente mensaje para realizar la acción dada por el controlador lo que no correspondería con la acción requerida anteriormente. De manera similar ocurriría si el retardo de tiempo es demasiado prolongado.

Varias redes industriales estándares como CAN, Profibus y otras [39], [40], han sido ampliamente usadas para sistemas de control en red por años. Estas redes tienen retardos deterministas y suficiente ancho de banda para realizar control de lazo cerrado en red utilizando técnicas de control disponibles sin causar degradación significativa de rendimiento o inestabilidad. Sin embargo, estos tipos de protocolos emplean dispositivos de red costosos y hacer dicha inversión es un factor problemático en el entorno de mercado competitivo de hoy [55].

Debido a la accesibilidad, la simplicidad, el rápido desarrollo, y uso generalizado, las redes de uso general, tales como Ethernet se han estudiado y propuesto como alternativas para aplicaciones de control en red [17]. Además su conectividad a Internet usando Protocolo de Internet (IP Internet Protocol) o el modo de transferencia asíncrono (ATM Asynchronous Transfer Mode), pueden proveer grandes beneficios

para el acceso remoto, control y monitoreo [41], [42] en la electrónica industrial [43] y aplicaciones de automatización de fábricas [44].

El protocolo de subcapa MAC (medium access control), el cual describe el protocolo para la obtención de acceso a la red, es responsable de satisfacer el requerimiento de respuesta de tiempo crítico/tiempo real sobre de la red y de la calidad y la confiabilidad de la comunicación entre nodos de red [35].

Los protocolos de control de acceso al medio (MAC) generalmente caen en dos categorías: *acceso aleatorio* y *planificado* [36]. Los más usados para redes de acceso aleatorio son los de detección de portadora de acceso múltiple (CSMA), mientras que Token Passing (TP) y Time Division Multiple Access (TDMA) son comúnmente empleados en redes planificadas. Las redes de control DeviceNet y Ethernet utilizan protocolos CSMA.

En [23] se menciona que las redes de control están basadas típicamente en uno de dos protocolos de control de acceso al medio, CAN (usados para Smart Distributed System (SDS), DeviceNet, y CAN Kingdom) y Token Ring o Bus (usados por Process Field Bus (PROFIBUS), Manufacturing Automation Protocol(MAP), ControlNet, y Fiber Distributed Data Interface (FDDI)).

Resultaría conveniente por lo tanto emplear redes basadas en protocolos MAC planificados, sin embargo la tendencia es emplear una red como Ethernet que no es conveniente para sistemas de control en red. Por lo tanto sigue siendo necesario desarrollar estrategias de planificación para que controlen el acceso al medio cuando se emplea una red como Ethernet.

Los elementos funcionales de una red se separan en *capas* o *niveles* con el fin de diseñar y construir tecnologías de red, la división o separación se hace generalmente siguiendo el modelo OSI (International Organization for Standardization) que básicamente son las fases por las que deben de pasar los datos para viajar de un dispositivo a otro sobre una red de comunicaciones y son siete capas [37]:

1. *Capa física*. Define las características físicas y eléctricas de la red.
2. *Capa de enlace de datos*. Define la estrategia para compartir el medio físico.
3. *Capa de red*. Proporciona un medio para la comunicación entre los sistemas abiertos para establecer, mantener y finalizar conexiones de red.

4. *Capa de transporte.* Garantiza la fiabilidad y la integridad de los datos a la capa de sesión (capa 5).
5. *Capa de sesión.* Provee dos entidades que se comunican para intercambiar datos entre sí.
6. *Capa de presentación.* Es donde los datos se empaquetan o desempaquetan, para su uso por la aplicación en ejecución.
7. *Capa de aplicación.* Esta capa es para los protocolos de usuario final y la aplicación final.

En cada capa de la red opera un protocolo, es decir, un conjunto de reglas para la interacción entre entidades.

La tecnología de red más usada TCP/IP (Transmission Control Protocol Operating Over the Internet Protocol) se basa en un modelo de cuatro capas que son [38]:

1. Capa de enlace
2. Capa de red
3. Capa de transporte
4. Capa de aplicación

A continuación se analizan algunas características de las redes de comunicación más empleadas y se dan algunas ventajas y desventajas que presentan las mismas para los propósitos de NCS.

2.3.1. Ethernet (CSMA/CD)

Ethernet usa el mecanismo de detección de portadora de acceso múltiple con detección de colisión (CSMA/CD) para la resolución de contención en el medio de comunicación. Cuando un nodo quiere transmitir, escucha a la red. Si la red está ocupada, espera hasta que la red esté desocupada; de otra manera transmite inmediatamente. Si dos o más nodos escuchan a la red inactiva y deciden transmitir

simultáneamente, los mensajes de los nodos de transmisión colisionan y los mensajes se dañan. Mientras transmite, un nodo debe además escuchar para detectar una colisión de mensaje. En la detección de una colisión entre dos o más mensajes, un nodo de transmisión detiene la transmisión y espera una longitud de tiempo arbitrario para volver a intentar la transmisión. Este tiempo aleatorio es determinado por el algoritmo de retroceso exponencial binario estándar (BEB): el tiempo de retransmisión es aleatoriamente elegido entre 0 y $(2^i - 1)$ ranuras de tiempo, donde i indica el i ésimo evento de colisión detectado por el nodo, y una ranura de tiempo es el tiempo mínimo necesario para una transmisión de ida y vuelta. Después de que se han detectado 10 colisiones, sin embargo, el intervalo es fijado a un máximo de 1023 ranuras. Después de 16 colisiones, el nodo deja de intentar transmitir y reporta falla de vuelta al nodo microprocesador. La recuperación puede ser intentada en capas superiores [45].

El formato de trama de Ethernet se muestra en la Figura 2.6. El encabezado está formado por 22 bytes, el fin de trama de 4 bytes y el tamaño de datos está entre 46 y 1500 bytes. Hay un requisito de tamaño mínimo de datos distinto de cero porque las normas establecen que las tramas válidas deben ser al menos de una longitud de 64 bytes de la dirección de destino a la suma de comprobación (72 bytes, incluyendo el preámbulo y comienzo del delimitador). Si la porción de datos de una trama es menor a 46 bytes, el campo de relleno es usado para completar el tamaño de datos mínimo. Hay dos razones para esta restricción de tamaño mínimo. En primer lugar, hace que sea más fácil distinguir entre los marcos válidos y basura. Cuando un “transceptor” detecta una colisión, trunca la trama actual, lo que significa que los bits perdidos y piezas de trama aparecen frecuentemente en el cable. Segundo, previene a un nodo de completar la transmisión de una trama corta antes de que el primer bit haya alcanzado el extremo del cable, donde pudiera colisionar con otra trama. Para Ethernet de 10 *Mbps* con una longitud máxima de 2500 *m* y cuatro repetidores, la ranura de tiempo es de 51.2 μs , que es el tiempo requerido para transmitir 64 bytes a 10 *Mbps* [45].

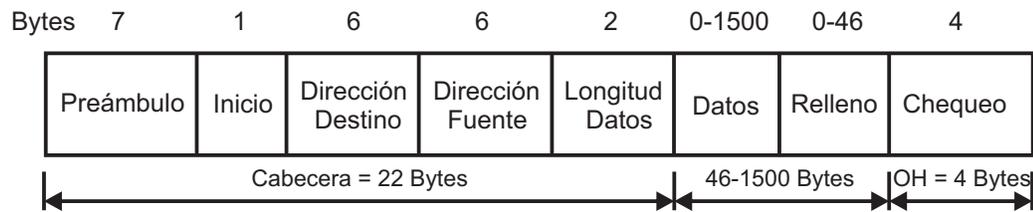


Figura 2.6: Formato de trama para protocolo CSMA/CD (Ethernet).

Ventajas

Debido a la baja sobrecarga de acceso al medio, Ethernet utiliza un algoritmo sencillo para el funcionamiento de la red y no tiene casi ningún retardo a bajas cargas de red. No se utiliza ancho de banda de comunicación para ganar acceso a la red comparado con el protocolo Token Bus o Token Ring. El tipo de Ethernet usado como red de control comúnmente utiliza el estándar de 10 *Mbps* (Modbus/TCP); el Ethernet de alta velocidad (100 *Mbps* o 1 *Gbps*) es principalmente utilizado en redes de datos pero, también se ha usado para aplicaciones de tiempo real [64], [65].

Desventajas

Ethernet es un protocolo no determinista y no soporta la priorización de paquetes. A altas cargas de red, las colisiones de mensajes son el mayor problema, debido a que afectan en gran medida la transferencia de datos y retardos de tiempo, que pueden ser no acotados. Ethernet captura el efecto existente en el algoritmo estándar BEB, en el que un nodo exclusivamente transmite paquetes por un tiempo prolongado a pesar de que otros nodos esperen el acceso al medio, causando degradación en el desempeño. Basado en el algoritmo BEB, un paquete puede ser descartado después de una serie de colisiones, además, la comunicación de extremo a extremo no es garantizada. Debido al requerimiento de un tamaño de trama mínimo válido, Ethernet usa un tamaño de mensaje grande para transmitir una cantidad pequeña de datos.

Muchas soluciones han sido propuestas para usar Ethernet en aplicaciones de control. Por ejemplo, cada mensaje pudiera ser estampado en el tiempo antes de su envío. Esto requiere la sincronización de reloj, lo cual no es fácil de lograr, especialmente con una red de este tipo. Varios esquemas basados en los retardos de retransmisión

determinista para los paquetes colisionados de un paquete de CSMA/CD resultan en retardo superior acotado para todos los paquetes transmitidos. Sin embargo, esto se logra a expensas de minimizar el desempeño de CSMA/CD en baja a moderada utilización del canal en términos del rendimiento del retardo. Otras soluciones además tratan de priorizar a CSMA/CD (por ejemplo LonWorks) para mejorar el tiempo de respuesta de paquetes críticos. Usar Ethernet conmutado mediante la subdivisión de la arquitectura de la red es otra forma de incrementar su eficiencia.

2.3.2. DeviceNet (CAN Bus)

DeviceNet es un controlador de área de red (CAN Controller Area Network) [66] donde los datos son transmitidos con telegramas o mensajes cortos y éstos pueden ser transmitidos periódicamente, esporádicamente, o en demanda [67]. El protocolo se utiliza en la capa física y en la capa de enlace de datos se usa un protocolo método de acceso (CSMA/AMP CSMA/arbitration on message priority). De modo que a cada mensaje le es asignada una prioridad que determina su acceso a la red y en caso de transmisión simultánea el mensaje con la prioridad más alta es entregado.

El flujo de bits de una transmisión es sincronizado con el bit de inicio, y el arbitraje se realiza en el siguiente identificador de mensaje, en la que un cero lógico es dominante sobre un uno lógico. Si un nodo quiere transmitir un mensaje espera hasta que el bus esté libre y entonces comienza a enviar el identificador de su mensaje bit por bit. Los conflictos por acceso al bus son resueltos durante la transmisión por un proceso de arbitraje a nivel de bit en el campo de arbitraje, que es la parte inicial de cada trama. Con esto, si dos nodos quieren transmitir sus paquetes al mismo tiempo, ellos continúan enviando sus paquetes y luego escuchan la red. Si uno de ellos recibe un bit diferente de sus bits enviados, éste pierde el derecho a continuar transmitiendo su mensaje y el otro gana el arbitraje. De esta manera una transmisión en curso nunca se corrompe.

En una red basada en CAN cada mensaje es etiquetado por un identificador que es único en toda la red. Cada nodo tiene un filtro de aceptación para decidir si desea recibir el mensaje o no. Se acepta el mensaje sólo si un identificador del objeto del mensaje corresponde con el identificador del mensaje entrante.

En la Figura 2.7 se muestra el formato de la trama. El encabezado completo es

de 47 bits, que incluye los campos de inicio de trama (SOF), 11 bits de arbitraje (Identificador), control, 16 bits de chequeo de redundancia cíclica (CRC), reconocimiento (ACK), fin de trama (EOF), y campos de intermedio (INT). El tamaño del campo de datos está entre 0 y 8 bytes.

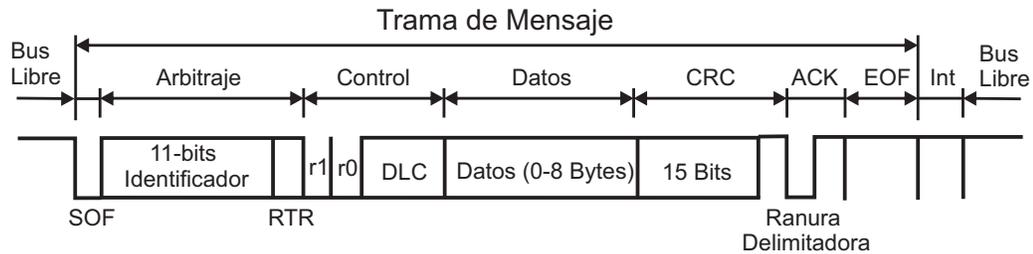


Figura 2.7: Formato de trama para el protocolo CAN.

Ventajas

Es un protocolo determinista optimizado para mensajes cortos. La prioridad del mensaje es especificada en el campo de arbitraje. Los mensajes con la prioridad mayor siempre ganan acceso al medio durante el arbitraje con lo que se garantiza la transmisión. Se puede definir y usar una cota del retardo de tiempo para los mensajes de mayor prioridad.

Desventajas

Este protocolo que originalmente fue desarrollado para su aplicación en la industria automotriz presenta desventajas como que la tasa de datos es lenta (54 kbps) comparada con otras redes de control y permite un máximo de 64 dispositivos en el bus. El requerimiento de sincronización de bits del protocolo CAN limita la longitud máxima de una red DeviceNet. No es adecuado para la transmisión de mensajes de gran tamaño aunque se pueden transmitir usando fragmentación [67].

2.3.3. ControlNet (Token-Passing-Bus-Based)

Es un protocolo de red determinista porque el máximo tiempo de espera antes de enviar una trama de mensaje puede ser caracterizado por el tiempo de rotación de la ficha. Los nodos en una red que emplea protocolo Token bus (IEEE 802.4) son organizados lógicamente en un anillo y en el caso de ControlNet, cada nodo conoce su predecesor y su sucesor (Figura 2.8).

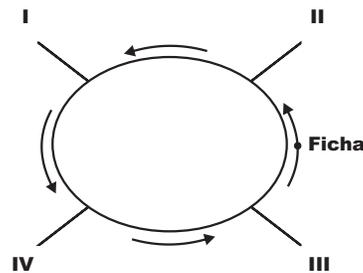


Figura 2.8: Ejemplo de Anillo Lógico

Durante la operación de la red, el nodo con la ficha transmite el mensaje de datos hasta que se agota su trama de mensajes o el tiempo que mantiene la ficha llega a su límite. El nodo entonces regenera la ficha y la pasa al nodo que le sucede en la red. Si el nodo no tiene mensajes para enviar, pasa la ficha al siguiente nodo.

Las tramas no colisionan ya que únicamente un nodo puede transmitir a la vez. El tiempo de espera máximo antes de que un nodo envíe un mensaje es el tiempo de rotación de la ficha. En caso de que el nodo que tenga la ficha dejara de transmitir y no pasara la ficha a su sucesor, el protocolo contiene disposiciones para regenerar la ficha. Los nodos también pueden ser añadidos dinámicamente al bus y ser retirados del anillo lógico.

En la estructura del formato de mensaje de ControlNet se muestra en la Figura 2.9.

Ventajas

El protocolo de token bus es determinístico y proporciona un excelente rendimiento y eficiencia a altas cargas de red. La naturaleza determinista de ControlNet

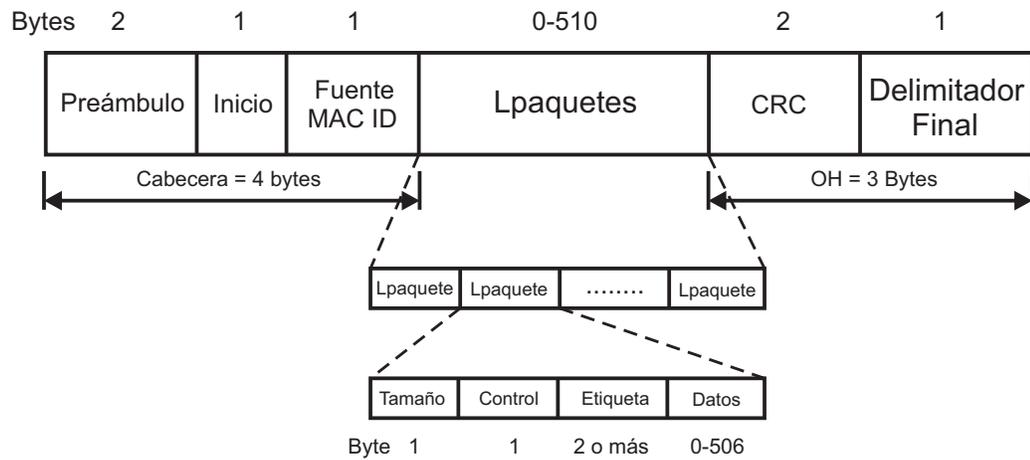


Figura 2.9: Formato de trama de mensaje de ControlNet

hace posible definir una cota máxima de tiempo de retardos inducidos por la red lo cual hace el análisis de tiempo más fácil. Durante la operación de la red, token bus puede añadir o remover nodos de la red dinámicamente. Esto contrasta con el caso de token ring, donde los nodos físicamente forman un anillo y no pueden ser agregados o removidos dinámicamente [35]. ControlNet es adecuado tanto para mensajes de tiempo no crítico como para mensajes de tiempo crítico.

Desventajas

Cuando hay muchos nodos en un anillo lógico una significativa cantidad de tiempo es consumida pasando la ficha al rededor del anillo lógico cuando el tráfico de datos en la red es ligero [35].

A continuación se ilustra el comportamiento de dos redes mencionadas anteriormente cuando ocurre una colisión. Se representan dos nodos transmitiendo mensajes continuamente (con respecto a una línea de tiempo fija). Un nodo en una red CSMA monitorea la red antes de cada transmisión. Cuando la red está libre, comienza la transmisión inmediatamente, como se muestra en el caso 1 de la Figura 2.10, donde los nodos i y j encuentran la red libre por lo que transmiten sin interrupción, lo cual se representa con una señal alta. De otra manera espera hasta que la red no

esté ocupada.

Cuando dos o más nodos tratan de transmitir simultáneamente, ocurre una colisión. La manera de solucionar la colisión depende del protocolo. DeviceNet, el cual es un controlador de área de red (CAN) en la capa física y la capa de enlace de datos, usa CSMA con protocolo de arbitraje a nivel de bits (CSMA/BA). Ya que los mensajes en CAN son priorizados, el mensaje con la prioridad mayor es transmitido sin interrupción cuando ocurre una colisión, y la transmisión del mensaje con la prioridad más baja es terminada y será reintentada cuando la red esté libre, como se muestra en el caso 2 de la Figura 2.10, donde la señal con valor medio del nodo j representa que la transmisión se interrumpe pues tiene prioridad más baja que la del nodo i y el cambio a valor alto significa que reintentará la transmisión una vez que la red se libera.

Ethernet emplea un CSMA con protocolo de detección de colisión (CSMA/CD). Cuando hay una colisión, todos los nodos afectados darán marcha atrás, esperan un tiempo aleatorio (decidido por el algoritmo BEB) y retransmiten como se muestra en el caso 3 de la Figura 2.10, donde se observa que en la colisión los nodos i y j interrumpen la transmisión teniendo así las señales con valor medio y después de un tiempo aleatorio los nodos retransmiten cambiando la señal a un valor alto.

El protocolo TP aparece en token bus (IEEE Standard 802.4), token ring (IEEE Standard 802.5) [45]. Un diagrama de tiempo para este tipo de red es mostrado en la Figura 2.11. Estos protocolos eliminan la contienda por el medio de red compartida permitiendo que cada nodo en la red transmita de acuerdo a un programa predeterminado. En token bus, la señal se pasa alrededor de un anillo lógico, mientras que en token ring, se pasa alrededor de un anillo físico.

Se pudiera pensar que una arquitectura de red anillo (token ring) con su comportamiento determinístico y mejor rendimiento a alto nivel de carga (en relación a su capacidad) pudiera llevar a su elección sobre detección de colisión como la corriente principal en arquitectura de red. Sin embargo, esto no ha ocurrido. Con mucho la corriente principal de la arquitectura de red dominante es utilizar Ethernet como la capa física para TCP/IP. Ethernet usa detección de colisiones como control de acceso (carrier sense multiple access/collision detection, CSMA/CD). [70].

El desafío, entonces, es determinar un método que dé a todos los nodos de la red

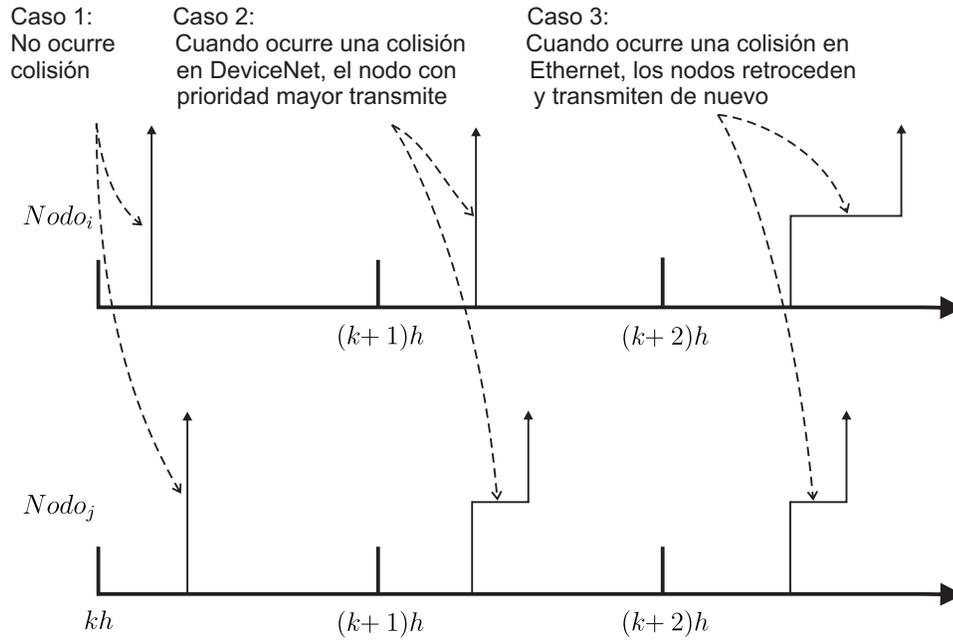


Figura 2.10: Diagrama de tiempo para dos nodos en una red de acceso aleatorio

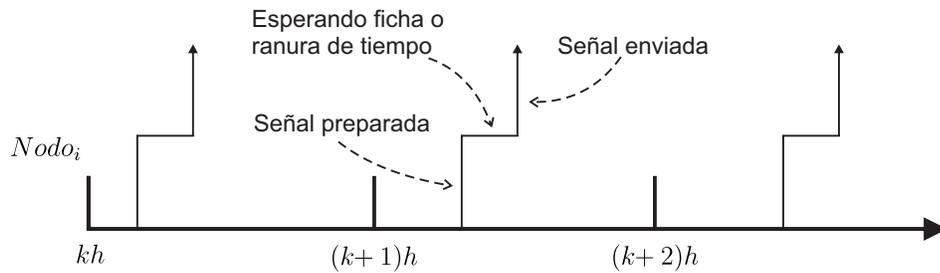


Figura 2.11: Diagrama de tiempo para un nodo arbitrario en una red planificada

acceso adecuado para la transmisión de paquetes [70]. Esto se hace mediante una planificación de red estática o dinámica que determina el orden en el cual las tareas o transmisiones son ejecutadas.

Y en un escenario donde Ethernet presenta desventajas como es un alto nivel de carga en la red, se pueda modificar las frecuencias de transmisión de los nodos de los sistemas de control en red para disminuir la carga en el medio de comunicación y garantizar la estabilidad de los sistemas.

2.4. Resumen

Los sistemas de control en red son sistemas tradicionales donde los dispositivos de control se encuentran distribuidos geográficamente y se comunican a través de una red de comunicación.

Las redes de comunicación candidatas para sistemas de control en red deben garantizar la transmisión y tener retardos de tiempo acotados. Las principales redes empleadas son DeviceNet, ControlNet y en los últimos años Ethernet.

Hoy en día la tendencia es utilizar la arquitectura de red Ethernet como la capa física para TCP/IP. Sin embargo dicha red no es adecuada para sistemas de control en red debido a que no es un protocolo determinista y no soporta la priorización de paquetes, además de que a altas cargas de red, las colisiones de mensajes afectan la transferencia de datos.

Por lo tanto se necesita un mecanismo para asegurar que todos los nodos participantes tengan acceso “equitativo”. En sistemas de control en red, es importante establecer prioridades a fin de asegurar que la actividades más críticas obtengan preferencia.

Capítulo 3

Estado del Arte

En los sistemas de control en red, no importando la red que se utilice, diversos efectos secundarios son introducidos en los lazos de control durante la comunicación. El resultado de un NCS es afectado pero no limitado por los siguientes factores [46]:

1. Restricciones de tasa de muestreo y distorsiones resultantes en las señales
2. Capacidad de la red para las comunicaciones
3. Perturbaciones introducidas en las comunicaciones
4. Tiempo de retardo en las mediciones y lazos de control
5. Pérdidas de datos o desecho de paquetes.

Los retardos de tiempo se clasifican en dos: de computación y de comunicación. Los retardos de comunicación ocurren cuando los procesadores (sensores, controladores y actuadores) intercambian datos a través del medio de comunicación compartido. Los retardos computacionales son ocasionados debido a que los procesadores toman tiempo en procesar datos. Esencialmente en los NCS se presenta:

- retardo de comunicación entre el sensor y el controlador τ_{sc}
- retardo computacional en el controlador τ_c
- retardo de comunicación entre el controlador y el actuador τ_{ca} .

Los retardos de tiempo pueden ser constantes, acotados, aleatorios, dependiendo de la red, política de planificación adoptada e inclusive por el hardware elegido [47].

Dependiendo de la manera en que los sensores, actuadores y controladores son sincronizados, existen diferentes configuraciones que provienen de si un nodo es manejado por evento o por reloj. Por evento significa que el nodo comienza su actividad cuando ocurre un evento como, por ejemplo, cuando recibe información de otro nodo a través de la red. Por reloj significa que el nodo comienza su actividad en un tiempo específico, por ejemplo, el nodo puede ejecutar su actividad periódicamente [48].

El desecho de paquetes de red ocurren ocasionalmente cuando hay fallas en los nodos o colisiones de mensajes. Consecuentemente, como la arquitectura distribuida puede manejar la falta de consistencia de los datos entre los diferentes procesadores, las aplicaciones de control pueden tomar decisiones de acuerdo con el dato erróneo [50].

La mayoría de los enfoques recientes para manejar estos problemas se dividen en dos direcciones principales implícitamente entrelazadas:

- construir buenas redes de comunicación en las cuales los efectos mencionados puedan ser descuidados
- diseñar controles capaces de tolerar en cierto grado los efectos citados anteriormente

Un protocolo adecuado de transmisión de mensajes es necesario para garantizar la calidad de servicio de la red (Quality of Service QoS), mientras que el diseño avanzado del controlador es deseable para garantizar la calidad de rendimiento del controlador (Quality of Performance QoP). Algunos trabajos recientes en la investigación de los sistemas de control en red consideran los parámetros de red y control simultáneamente para asegurar QoS de la red y QoP del control [48].

Aunque los NCS son un campo de investigación relativamente nuevo, se han hecho varios trabajos para solucionar los problemas que se presentan. El análisis y modelo de los sistemas de control en red ha sido conducido utilizando modelos en tiempo continuo y tiempo discreto aunque es más natural emplear los últimos debido a que en NCS las señales (de sensor o de actuador) son muestreadas y luego transmitidas en la red después de un retardo.

A continuación se mencionan algunas contribuciones que se han hecho en este campo de investigación para solucionar los problemas que se presentan por la inclusión de la red en los sistemas de control, haciendo especial énfasis en las técnicas de planificación de red que se han propuesto en los últimos años

3.1. Protocolos y Algoritmos de Planificación de Red

Walsh *y otros* [49] presentan un novedoso protocolo de red TOD (Try One Discard) el cual emplea un planificador dinámico, asignando los recursos de la red con base en la necesidad. En TOD, el nodo con el mayor error ponderado del último valor reportado, ganará la competencia por el recurso de la red. La técnica de planificación empleada recibe el nombre de máximo error primero (maximum-error-first MEF) y el protocolo TDO porque si un paquete de datos falla en ganar la competencia por la red, se descarta y los nuevos datos se utilizan la próxima vez.

Los autores definen el concepto de intervalo de transferencia máxima permitida (maximum allowable transfer interval MATI) para garantizar la estabilidad absoluta de los sistemas de control en red. Y se provee por primera vez una prueba analítica para la estabilidad del protocolo presentado y para el protocolo de planificación estática. Sin embargo el intervalo o cota que se obtiene es normalmente conservadora y el protocolo TDO es más sensible al ruido que el planificador estático.

Hong [51] desarrolla un algoritmo de planificación que determina el tiempo de muestreo de datos de cada lazo de control para satisfacer los requerimientos del rendimiento de los sistemas de control. El plazo límite de un dato muestreado está definido como el tiempo cuando el siguiente dato es muestreado. Un algoritmo de planificación es factible si los tiempos de muestreo de datos son planificados tal que ningún nodo experimente desbordamiento, es decir, los datos no llegan al nodo receptor dentro de su plazo límite.

El autor determina los tiempos de muestreo usando el concepto de ventana donde, durante un intervalo de tiempos de muestreo, los nodos en el medio comparten dinámicamente un limitado número de ventanas, de tal manera que el número de datos servidos durante cualquier intervalo de tiempo de muestreo no excede la cantidad

de ventanas.

Se satisfacen los requerimientos de desempeño de cada lazo de control, por ejemplo, el retardo del lazo dentro del máximo valor permitido, la eliminación de las muestras de datos rechazados, pero la utilización de los recursos de la red son considerablemente incrementados. Esta metodología establece los retardos de tiempo en un rango y evita colisiones de paquetes, siendo aplicable a sistemas Polling y Token Passing. Una restricción para la técnica es que los retardos inducidos de red sean menores que los periodos de muestreo.

Kim *y otros* [52] proponen un nuevo método para obtener una cota máxima de retardo permitido para el planificador de un NCS. El método que proponen es formulado en términos de LMIs (linear matrix inequalities), y puede dar una cota de retardo mucho menos conservadora que otros métodos. Sobre la base del retardo obtenido mediante el método propuesto, el ancho de banda se asigna a cada nodo, y el periodo de muestreo de cada sensor y controlador es determinado. El método presentado puede manejar tres tipos de datos, datos periódicos, datos esporádicos y mensajes de datos. Garantiza la transmisión en tiempo real de datos periódicos y esporádicos y la mínima utilización de la red para mensajes de datos de tiempo no real.

Los trabajos de Nesić y Teel [53], [54] son estudios más teóricos sobre protocolos. En [53] considera una nueva clase de protocolos de Lyapunov en NCS global, uniforme y asintóticamente estables (UGAS de su nombre en inglés). Se muestra que si un controlador es diseñado sin tomar en cuenta la red, de manera que dé estabilidad entrada-estado con respecto a perturbaciones externas (no necesariamente con respecto al error que vendrá de la implementación de la red), entonces el mismo controlador logrará estabilidad semiglobal práctica entrada-estado para los sistemas de control en red cuando se implementa a través de la red con un protocolo de Lyapunov UGAS. El parámetro ajustable con respecto al cual la estabilidad semiglobal práctica entrada-estado se consigue es el intervalo máximo permitido de transferencia entre los tiempos de transmisión.

Mientras que en [54] se estudia la estabilidad L_p entrada-salida de NCS para una larga clase de protocolos de planificación de red. Se muestra que los protocolos estáticos y dinámicos TOD pertenecen a esta clase. Los resultados obtenidos pro-

porcionan una estructura unificada para generar nuevos protocolos de planificación que preserven las propiedades de la estabilidad L_p del sistema, si un parámetro es elegido para ser suficientemente pequeño. Los resultados de los trabajos de [53] y [54] pueden ser usados para modelar NCSs con paquetes de datos desechados.

Los dos trabajos anteriores presentan fundamentos teóricos para probar –como trabajo futuro de tesis– que el método de planificación preserva la estabilidad del sistema de control en red, así mismo para obtener un intervalo de transferencia máximo permitido cuando se diseñe un controlador que compense las imperfecciones de la red para los sistemas de control.

En el trabajo de Chow y Tipsuwan [55], se investiga cómo el rendimiento de un sistema de control en red puede ser mejorado si la red puede garantizar calidad de servicio (QoS). Debido a las demandas de tráfico de red variante en el tiempo y las perturbaciones, los requerimientos de calidad de servicio proporcionados por la red pueden cambiar. Una red puede reasignar sus recursos y puede ser incapaz de proporcionar los requerimientos de QoS a la aplicación de una red de control como se necesite. Por lo tanto la aplicación puede tener que degradar correctamente su rendimiento y el rendimiento de la tarea lo mejor posible con la calidad de servicio de red. Se propone un enfoque novedoso para un motor CD en red, utilizando la ganancia adaptable del controlador para compensar los cambios en los requerimientos de QoS.

Un método de planificación de una red para garantizar estabilidad y rendimiento del controlador se considera en Walsh *y otros* [56]. Se propone y validan algoritmos para seleccionar identificadores de mensajes para NCSs dinámicamente planificados. Los niveles de selección de prioridad propuestos son: de codificación fija y de autoescala. Proporcionan la prueba de que el sistema es últimamente asintóticamente acotado de manera uniforme en el primer caso y asintóticamente estable para el segundo.

Peng [57] muestra que si los parámetros originales del sistema son planificables se puede cambiar el periodo de muestreo de los lazos de control en un conjunto dado bajo las restricciones de calidad de desempeño (QoP) y calidad de servicios (QoSs) para obtener un rendimiento óptimo integral. Se estudia la interacción entre el desempeño del control y periodo de muestreo utilizando como índice de desempeño

el Error Integral Absoluto y se demuestra que existe una cota superior e inferior de periodo de muestreo en NCS que satisface la QoP.

La metodología anterior se emplea en esta tesis para determinar las frecuencias de transmisión máximas y mínimas de los sistemas de control en red que se utilizan para la validación de la estrategia control sobre red que se propone.

El impacto de la arquitectura de red en el rendimiento del control se discute en Feng-Li *y otros* [58] y se proveen consideraciones relacionadas con la calidad de desempeño de control (QoP) y calidad de servicios (QoS) de la red. Identifica varios componentes claves en el retardo de tiempo a través del análisis de protocolos de red y la dinámica de control. El análisis de los parámetros de la red y de control se utiliza para determinar un rango de trabajo aceptable de periodos de muestreo en un NCS.

Las características de rendimiento son guías útiles para la elección de los parámetros de red y el control en el diseño de un NCS y serán empleadas en el siguiente capítulo para establecer las regiones de planificabilidad.

En Menéndez y Benítez [59] se diseña una estrategia de planificación basada en el análisis de NCS, se demuestra que el rendimiento del sistema depende no únicamente de los periodos de muestreo de los componentes individuales, sino también del tiempo de dispersión entre los periodos. La estrategia de planificación consiste en un periodo de operación global para el sistema llamado periodo base y un rango de periodo para cada nodo del NCS que es obtenido moviendo el periodo base dentro de un porcentaje llamado factor de dispersión. El periodo base y el factor de dispersión se utilizan para obtener un nuevo periodo para cada nodo que cuantifica la QoP. Se muestra que es posible tener un sistema distribuido en tiempo real planificable pero posiblemente inestable.

Relacionado con este trabajo de tesis, Esquivel y Benítez [60] proponen un nuevo enfoque para planificar un sistema distribuido, a través de modificaciones en la frecuencia de transmisión de los componentes individuales del sistema de control en red. La planificación se logra modificando las frecuencias de transmisión dentro de una región donde el rendimiento del sistema no es afectado. Los autores proponen un sistema lineal invariante en el tiempo en el cual los coeficientes de la matriz de estados son las relaciones entre las frecuencias de transmisión de cada nodo y a través de

un controlador LQR se modifican las frecuencias de transmisión dentro de la región acotada por las frecuencias máximas y mínimas en donde el rendimiento del sistema es aceptable.

Se comprueba la efectividad del método aplicándolo a un helicóptero de dos grados de libertad. Sin embargo, en el modelo no se consideran retardos inducidos por la red, el tiempo de transmisión se considera constante, se asume que no hay pérdida de paquetes y no se consideran retardos computacionales ni retardos entre la comunicación de sensor-controlador y controlador-actuador.

3.2. Resumen

La inclusión de la red de comunicación en los sistemas de control trae consigo problemas relacionados con la calidad de servicios (QoS) y la calidad de rendimiento del (QoP) del controlador. En los últimos años se han desarrollado diferentes estrategias para contrarrestar los efectos producidos por la red de comunicación como son retardos, pérdida de paquetes, perturbaciones, etc.

En este capítulo se revisaron principalmente algunas técnicas que se han propuesto desde el enfoque de planificación de red debido a la relación que guarda con este trabajo. Algunas metodologías se toman como base para establecer las regiones de planificación y frecuencias de transmisión óptimas que cumplan con los requisitos de QoP y QoS, y otras se proponen como base para en un trabajo futuro diseñar controladores que sean capaces de tolerar las imperfecciones de la red y emplearlos en codiseño con la estrategia de planificación de esta tesis.

Aunque se han hecho grandes contribuciones en el campo de investigación de los sistemas de control en red aún queda mucho trabajo por hacerse en esta área que se encuentra en su infancia [47].

Capítulo 4

Modelo de Red

En los sistemas discretos es deseable una rápida tasa de muestreo ya que de esta manera el diseño de control de tiempo discreto y el rendimiento se aproxima al de un sistema en tiempo continuo. Los sistemas de control en red generalmente se estudian como sistemas de tiempo discreto debido a que la información que se intercambia a través de la red de comunicación primeramente se empaqueta y posteriormente se envía a determinada frecuencia. Sin embargo en NCSs, una rápida tasa de transmisión incrementa la carga de la red, lo que genera retardos prolongados de las señales y en el peor de los casos pudiera causar la inestabilidad de los sistemas de control [61].

Por lo tanto, es necesario encontrar frecuencias de transmisión que puedan lograr no solamente el desempeño deseado del sistema de control y a su vez tolerar los retardos inducidos de la red, sino además minimizar la utilización de la red, con el objetivo de disminuir la carga de la red.

La elección adecuada de las frecuencias de transmisión evitará que se presenten colisiones cuando se envíe información por el medio de comunicación y por consecuencia que se produzcan desechos de paquetes y retardos debido a la transmisión simultánea de dos o más nodos. La modificación de las frecuencias de transmisión se puede conseguir modelando como un sistema lineal la red y considerando como estados las frecuencias de transmisión de los nodos y utilizando un controlador para llevar las salidas del sistema a una región donde se respeta el compromiso entre utilización, rendimiento de control y calidad de servicios para el sistema de control en

red.

4.1. Región de planificabilidad

La región que se desea encontrar debe cumplir con las características de QoS y QoP, además de cumplir con la restricción de planificabilidad

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{h_i} = \sum_{i=1}^n c_i f_i \leq 1 \quad (4.1)$$

en donde la segunda igualdad está dada en términos de la frecuencia f_i .

Un indicio para determinar dicha región es considerar que la limitación de recursos de red compartidos entre múltiples nodos impone una cota f_{max} en la frecuencia de transmisión de cada nodo y el rendimiento de control impone una cota f_{min} en la frecuencia de transmisión. Por lo tanto se investiga analíticamente el efecto de la frecuencia de transmisión de cada nodo de red que ocupa un elemento del sistema de control (sensor, controlador o actuador) en el desempeño de la respuesta del sistema de control en red.

El cálculo se realiza fuera de línea con la finalidad de obtener previamente las frecuencias que cumplan los requisitos mencionados anteriormente y mediante simulaciones empleando **TrueTime** [62], que es un simulador para sistemas de control de tiempo real basado en *Matlab/Simulink* y facilita la simulación de transmisiones de red entre otras cosas. Esta herramienta permite elegir entre 10 diferentes tipos de red para la simulación, entre éstas una red Ethernet de 10 *Mbps*.

Modificando la frecuencia de transmisión de los agentes del sistema de control en red y tomando el error integral absoluto (Integral Absolute Error IAE) como índice de desempeño

$$IAE = \int_{t_0}^{t_f} |e(t)| dt = \int_{t_0}^{t_f} |r(t) - y(t)| dt$$

donde $r(t)$ es la señal de referencia del sistema de control en red, $y(t)$ es la señal de salida del sistema, t_0 y t_f son los tiempos de inicio y finalización de la simulación, se puede generar una gráfica como la que se muestra en la Figura 4.1 que proporciona una manera clara de establecer una región de frecuencias de transmisión para cada nodo donde el sistema de control en red cumple con QoS, QoP y la condición de

planificabilidad.

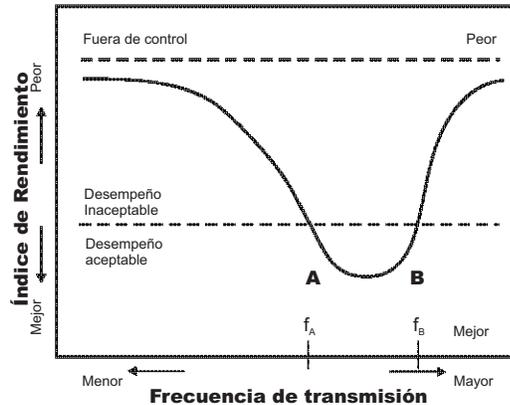


Figura 4.1: Frecuencia de transmisión contra Rendimiento IAE.

Como se observa en la Figura 4.1, a mayor frecuencia de transmisión se presentará un aumento en el tráfico de red y si llega a superar la cota B llevará a un desempeño inaceptable e incluso a la inestabilidad del sistema, mientras que una frecuencia de transmisión menor reduce el tráfico en la red, sin embargo, si es menor a la cota A no solamente provocará un rendimiento inaceptable sino que además causará la inestabilidad del sistema debido a la falta de información. De manera que el compromiso entre QoS y QoP se cumple con frecuencias de transmisión que pertenezcan al conjunto acotado por A y B .

Es necesario realizar este estudio variando las frecuencias de transmisión de cada nodo y hacer combinaciones con los demás nodos para determinar las cotas f_{max} y f_{min} de cada nodo que esté asignado a un dispositivo del NCS de modo que se obtendrá una región para cada nodo (ver Figura 4.2). A esas regiones se les llamará *regiones de planificabilidad* [60] y se denotan como \mathcal{L}_i .

Las regiones de planificabilidad pueden ser expresadas como

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_1 &= \{(x_1, y_1) \mid x_1 \in \mathbb{R}^+, f_{min}^1 \leq y_1 \leq f_{max}^1\} \\ \mathcal{L}_2 &= \{(x_2, y_2) \mid x_2 \in \mathbb{R}^+, f_{min}^2 \leq y_2 \leq f_{max}^2\} \\ \mathcal{L}_3 &= \{(x_3, y_3) \mid x_3 \in \mathbb{R}^+, f_{min}^3 \leq y_3 \leq f_{max}^3\} \\ &\vdots \\ \mathcal{L}_n &= \{(x_n, y_n) \mid x_n \in \mathbb{R}^+, f_{min}^n \leq y_n \leq f_{max}^n\} \end{aligned}$$

donde:

x_i = la frecuencia de transmisión nominal para el nodo i

y_i = la frecuencia de transmisión de salida para el nodo i

f_{min}^i = la frecuencia de transmisión mínima para el nodo i

f_{max}^i = la frecuencia de transmisión máxima para el nodo i

La acción de un controlador es necesaria para que las frecuencias converjan a la región correspondiente calculada para cada nodo y garantizar la permanencia en la zona ante perturbaciones. Esto se ilustra en la Figura 4.2, donde para cierto tiempo "t" el controlador hace que las frecuencias de tres nodos converjan a sus respectivas regiones de planificabilidad calculadas previamente.

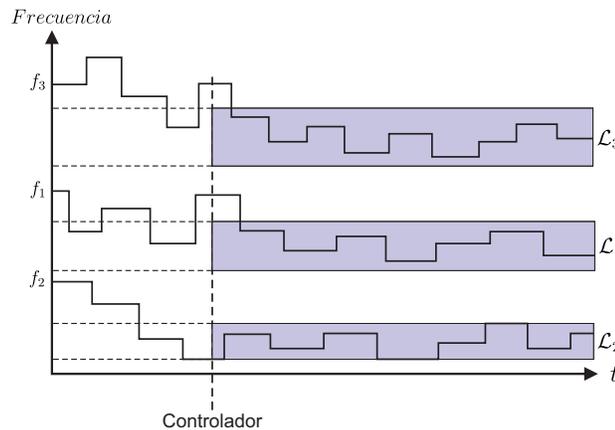


Figura 4.2: Regiones de planificabilidad para tres diferentes frecuencias de transmisión.

Dependiendo de la dinámica de los sistemas que se incluyan en una misma red de comunicación se puede presentar el caso donde sea posible establecer una región global para la frecuencia de transmisión de los nodos de los diferentes sistemas de control en red, es decir, una región común para todos los nodos de los NCSs.

Este caso se ilustra en la Figura 4.3 donde se observan las frecuencias de transmisión de tres nodos y en el instante t la acción de un controlador que hace que las frecuencias converjan a la zona o región de planificabilidad global.

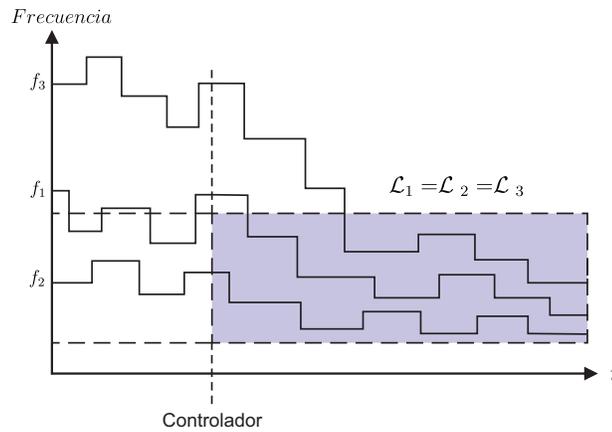


Figura 4.3: Región de planificabilidad global a la que convergen tres diferentes frecuencias de transmisión.

4.2. Modelo de frecuencias de transmisión

Considérese un NCS con r agentes donde se ejecutan n tareas que transmiten datos por medio de una red de comunicación. La tarea τ_i con un periodo p_i , tiempo de transmisión c_i y frecuencia de transmisión de datos $\frac{1}{p_i}$ donde $i = 1, \dots, n$. La razón de cambio de las frecuencias de transmisión se puede representar como un sistema lineal invariante en el tiempo:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{4.2}$$

El sistema se modela considerando que la transmisión es periódica y se propone la relación de las frecuencias mínimas dentro del *Macro ciclo*, un concepto que se utiliza en planificación estática y se define como el mínimo común múltiplo de todos los periodos de todas las variables [63]. También es llamado *Hiperperiodo* [21], [24].

La utilización de la red dependerá de la frecuencia y tiempo de transmisión, este último lo puede determinar el protocolo de red que se emplee, por ejemplo, para el caso de un protocolo DeviceNet las especificaciones indican que el tiempo de transmisión es de 0.004 segundos [71]. Para simplificar el análisis se considera igual el tiempo de transmisión para todos los nodos

$$c_1 = c_2 = c_3 = \dots c_n$$

Debido a que se utiliza el concepto de frecuencia de transmisión f_i que es el inverso al periodo $\frac{1}{p_i}$, el macrociclo se expresará como el máximo común divisor de todas las frecuencias

$$\Lambda = mcd(f_1, \dots, f_n) \quad (4.3)$$

Haciendo la consideración anterior la frecuencia del nodo i estará expresada por la relación

$$a_{ij} = \frac{\Lambda}{f_{min^i}} \quad si \quad i = j \quad (4.4)$$

donde f_{min^i} es la frecuencia mínima del nodo i que pertenece a la región de planificabilidad, a dicha expresión se le llamará frecuencia base. Como se plantea en [24], la relación anterior implica que por lo menos una tarea de transmisión del nodo i se completa durante el intervalo de tiempo llamado hiperperiodo o macrociclo.

Para la relación de frecuencias de transmisión entre nodos, se propone que debe existir un cambio en el plazo límite de las tareas de transmisión con el fin de evitar que ocurran colisiones durante el macrociclo. En [21] se establece que el cambio de plazo límite para dos tareas se obtiene mediante la transformación:

$$\left\{ \begin{array}{l} d_1^* = d_2 - c_2 \\ d_2^* = d_2 \end{array} \right. \quad (4.5)$$

donde d_1^* y d_2^* son los nuevos plazos límites para las dos tareas considerando que

$$d_1^* \leq d_2^*.$$

Por consiguiente, partiendo de la frecuencia base se puede determinar cómo debe ser el nuevo plazo límite cuando se relaciona con las tareas de transmisión del resto de los nodos reescribiendo (4.5) como

$$\begin{cases} d_1 = \frac{\Lambda}{f_{min}^1} \\ d_2 = \frac{\Lambda}{f_{min}^1} \pm \Lambda c_1 \\ d_3 = \frac{\Lambda}{f_{min}^1} \pm \Lambda (c_1 + c_2) \\ \vdots \\ d_n = \frac{\Lambda}{f_{min}^1} \pm \Lambda (c_1 + \dots + c_{n-1}) \end{cases} \quad (4.6)$$

en donde el signo \pm lo determinará la precedencia de las tareas.

Con base en lo anterior y tomando en cuenta que los consumos o tiempos de transmisión son iguales, durante el macrociclo la relación entre frecuencias que garantiza el mínimo de colisiones se propone mediante la expresión:

$$a_{ij} = \frac{\Lambda}{f_{min}^i} \pm \Lambda |j - i| c \quad si \quad i \neq j \quad (4.7)$$

El signo de la ecuación (4.7) será positivo para los coeficientes por arriba de la diagonal a_{ij} y negativo para los coeficientes que están bajo la diagonal debido a la precedencia de tareas.

La propuesta anterior cambia con respecto a la dada en [60] donde se asume que la relación de frecuencias en el macrociclo y la relación entre nodos está dada por:

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{\Lambda}{f_{min}^i} & i = j \\ \frac{f_{min}^j}{f_{min}^i} & i \neq j \end{cases}$$

Los coeficientes de la matriz de entradas se relacionan con las frecuencias mínimas

$$b_{ij} = \begin{cases} f_{min}^i & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (4.8)$$

Y las salidas del sistema son las frecuencias para los nodos de manera que se tiene

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (4.9)$$

Así el sistema lineal de frecuencias de transmisión para NCSs se puede reescribir como

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{\Lambda}{f_{min}^1} & \frac{\Lambda}{f_{min}^1} - \Lambda |j - i| c & \dots & \frac{\Lambda}{f_{min}^n} + \Lambda |j - i| c & 0 \\ \frac{\Lambda}{f_{min}^1} - \Lambda |j - i| c & \frac{\Lambda}{f_{min}^2} & \dots & \frac{\Lambda}{f_{min}^n} + \Lambda |j - i| c & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \frac{\Lambda}{f_{min}^1} - \Lambda |j - i| c & \frac{\Lambda}{f_{min}^2} - \Lambda |j - i| c & \dots & \frac{\Lambda}{f_{min}^n} & 0 \\ c_1 & c_2 & \dots & c_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ x_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{min}^1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & f_{min}^2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & f_{min}^n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \\ u_c \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \\ x_c \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

donde

- x_1 = la frecuencia de transmisión del nodo 1
- x_2 = la frecuencia de transmisión del nodo 2
- \vdots
- x_n = la frecuencia de transmisión del nodo n
- x_c = la utilización de la red

y

- u_1 = es la entrada de frecuencia 1 del sistema
- u_2 = es la entrada de frecuencia 2 del sistema
- \vdots
- u_n = es la entrada de frecuencia n del sistema
- u_c = es la entrada c del sistema

El último estado x_c añadido al sistema corresponde a la utilización de la red que en todo momento debe cumplir la restricción de planificabilidad (ecuación (4.1)).

4.3. Resumen

En NCSs una rápida tasa de transmisión de datos incrementa la carga de la red, lo que puede llevar a la inestabilidad de los sistemas de control, por lo tanto la elección correcta de las frecuencias de transmisión es un factor importante a considerar en el diseño. Existe un rango donde dichas frecuencias brindan la calidad de servicios y el rendimiento de control adecuados.

La región se calcula fuera de línea modificando las frecuencias de transmisión de los nodos que transfieren la información de los dispositivos de control y observando el efecto que causa en la respuesta del sistema de control, tomando como índice de desempeño el error integral absoluto. La región obtenida dará la cota inferior y superior de frecuencias donde el sistema de control en red permanece estable y cumple con las restricciones de QoS y QoP.

La razón de cambio de las frecuencias de transmisión nominales en una red Ethernet se modela como un sistema lineal invariante en el tiempo cuyos coeficientes son determinados por la representación de las frecuencias de transmisión mínimas dentro del macrociclo y se asume una relación entre las tareas de transmisión de los nodos considerando que existe un cambio de plazo límite en la tarea de transmisión de un nodo ocasionado por la evolución del resto de los nodos.

Capítulo 5

Caso de Estudio

Para la validación del control sobre red con base en frecuencias de transmisión se utilizan dos sistemas de control, un helicóptero de 2-GDL (dos grados de libertad) y un levitador magnético, ambos de Quanser y sus dispositivos de control son comunicados a través de una red Ethernet de 10 *Mbps*.

Helicóptero de 2-GDL

El helicóptero es un modelo montado en una base fija con dos hélices impulsados por motores de Corriente Directa (CD). La hélice frontal controla la elevación de la nariz del helicóptero sobre el eje de cabeceo y la hélice trasera controla el movimiento de lado a lado o viaje del helicóptero sobre el eje de guiñado. Los ángulos de cabeceo y guiñado se miden usando codificadores de alta resolución.

El modelo es un sistema MIMO (Multiple Input-Multiple Output) no lineal invariante en el tiempo e inestable en lazo abierto. Las ecuaciones no lineales de movimiento del sistema helicóptero de 2-GDL se derivan de las Ecuaciones de Euler-Lagrange y se pueden consultar en [15], [73]. En [72] se presenta el modelo linealizado en el punto de equilibrio cero, obteniendo la representación de espacio de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

El vector de estados es:

$$x = \begin{bmatrix} \theta & \lambda & \dot{\theta} & \dot{\lambda} \end{bmatrix} T$$

el vector de salidas es:

$$y = \begin{bmatrix} \theta & \lambda \end{bmatrix} T$$

y el vector de entradas es:

$$u = \begin{bmatrix} V_p & V_y \end{bmatrix}$$

donde θ y λ son los ángulos de cabeceo y guiñado respectivamente y V_p y V_y son los voltajes para los motores que impulsan las hélices de cabeceo y guiñado respectivamente. Las matrices del helicóptero en espacio de estados correspondientes son:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{B_p}{J_p+ml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{B_y}{J_y+ml^2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_{pp}}{J_p+ml^2} & \frac{K_{py}}{J_p+ml^2} \\ \frac{K_{yp}}{J_y+ml^2} & \frac{K_{yy}}{J_y+ml^2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

En donde:

K_{pp} es la constante del par del motor/hélice de cabeceo o inclinación actuando sobre el eje de inclinación

K_{yy} es la constante del par del motor/hélice de guiñado o desvío actuando sobre el eje de desvío

K_{py} es la constante del par del motor/hélice de desvío actuando sobre el eje de inclinación

K_{yp} es la constante del par del motor/hélice de inclinación actuando sobre el eje de desvío

B_p es el factor de amortiguamiento viscoso equivalente sobre el eje de inclinación

B_y es el factor de amortiguamiento viscoso equivalente sobre el eje de desvío

l es la longitud al centro de masa del cuerpo del helicóptero

m es la masa total del helicóptero

En la Tabla 5.1 se proporciona los valores para los parámetros mencionados del helicóptero, el resto de los parámetros se pueden consultar en [72].

Símbolo	Valor	Unidades
K_{pp}	0.204	$N \cdot m/V$
K_{yy}	0.072	$N \cdot m/V$
K_{py}	0.0068	$N \cdot m/V$
K_{yp}	0.0219	$N \cdot m/V$
B_p	0.800	N/V
B_y	0.318	N/V
m	1.3872	kg
l	0.186	m

Tabla 5.1: Parámetros del Helicóptero

El controlador que se emplea para regular los ángulos de elevación y viaje del helicóptero a las posiciones deseadas es un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) cuyas ganancias son calculadas utilizando un algoritmo LQR (Linear-Quadratic Regulator). El controlador por retroalimentación de estados es definido [72]:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_y \end{bmatrix} = K_{PD}(x_d - x) + V_i + \begin{bmatrix} u_{ff} \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde

$$K_{PD} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \end{bmatrix}$$

es la ganancia proporcional derivativa,

$$x_d = \begin{bmatrix} \theta_d & \lambda_d & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

es el estado deseado, x es el estado definido anteriormente

$$V_i = \begin{bmatrix} \int k_{15}(x_{d1} - x_1)dt + \int k_{16}(x_{d2} - x_2)dt \\ \int k_{25}(x_{d1} - x_1)dt + \int k_{26}(x_{d2} - x_2)dt \end{bmatrix}$$

es el control integral, y

$$U_{ff} = \frac{K_{ff}mgl \cos(x_{d1})}{K_{pp}}$$

es el control de retroalimentación hacia adelante no lineal para compensar el par gravitacional.

Las variables θ_d y λ_d son los ángulos deseados de cabeceo y guiñado del helicóptero. En espacio de estados, el ángulo de elevación deseado es x_{d1} y el ángulo de desvío deseado es x_{d2} . Las ganancias k_{11} y k_{12} son las ganancias proporcionales de control para el motor delantero y las ganancias k_{21} y k_{22} son las ganancias proporcionales de control para el motor trasero. Así mismo, k_{13} y k_{14} son las ganancias derivativas de control para el motor delantero y k_{23} y k_{24} son las ganancias derivativas para el motor trasero. Las ganancias integrales de control para el motor delantero son k_{15} y k_{16} y para el motor trasero son k_{25} y k_{26} .

Las ganancias del control PID se calculan utilizando un esquema LQR. El sistema de estados es primeramente aumentado para incluir las integrales de los estados de cabeceo y guiñado

$$x_i^T = \left[\theta, \lambda, \dot{\theta}, \dot{\lambda}, \int \theta dt, \int \lambda dt \right]$$

con las matrices de peso Q y R adecuadas se obtiene el control total

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \end{bmatrix}$$

Levitador Magnético

El sistema de levitación magnético (MAGLEV) es un electroimán encerrado en una caja rectangular. Un polo del electroimán está frente a un poste negro donde reposa una bola de acero. La elevación de la bola desde el poste se mide usando un sensor integrado en el poste. El objetivo del sistema es hacer levitar la bola de acero desde el poste a una posición deseada energizando el electroimán.

El sistema es SISO (Single Input-Single Output) no lineal variante en el tiempo e inestable en lazo abierto. El modelo del sistema de levitación magnética se obtiene del diagrama de la Figura 5.1.

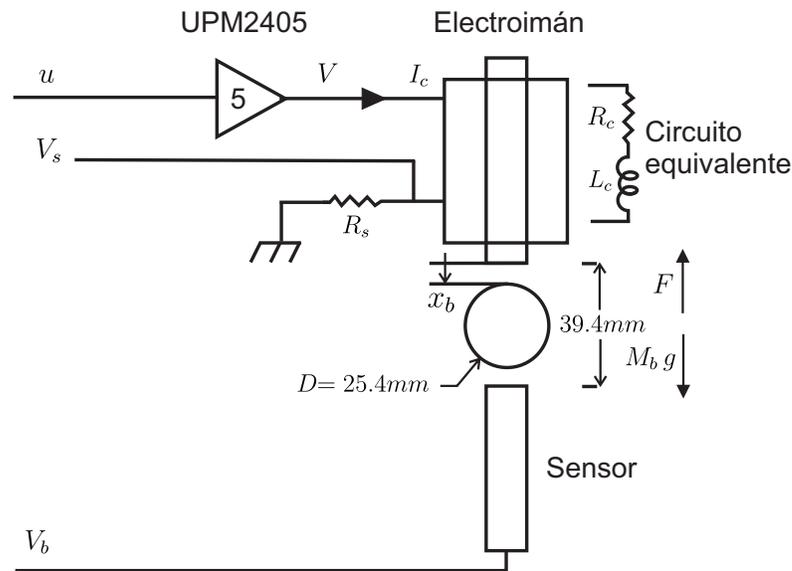


Figura 5.1: Diagrama del sistema MAGLEV

En [75] se deducen las ecuaciones del sistema de levitación y consideran el conjunto de variables

$$x = (x_1, x_2, x_3)$$

donde

$x_1 = x_b$ la posición de la bola

$x_2 = \dot{x}_b$ la velocidad de la bola

$x_3 = I_c$ la intensidad de la corriente de la bobina

obteniendo

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{-K_m x_3^2}{2M_b(x_1 + a)^2} + g \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{L_c}(-R x_3 + u) \end{aligned}$$

donde $R = R_c + R_s$ y $u = Vc$ es el voltaje de entrada y

R_c es la resistencia del electromagneto

R_s es la resistencia en serie

K_m es la constante de fuerza electromagnética

a es una constante

M_b es la masa de la bola

g es la constante gravitacional

L_c es la inductancia de la bobina

En la Tabla 5.2 se proporciona los valores para los parámetros del levitador magnético, para más detalles se puede consultar [74].

El sistema es linealizado alrededor del punto de equilibrio $x_{eq} = (x_{beq}, 0, i_{eq})$ llegando a la representación en espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{2g}{x_{beq} + a} x_1 - \frac{\sqrt{2K_m M_b g}}{M_b(x_{beq} + a)} x_3 \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{L_c}(-R x_3 + u) \end{aligned}$$

Símbolo	Valor	Unidades
L_c	0.4125	H
R_c	10	Ω
R_s	1	Ω
k_m	$6.5308e^{-5}$	Nm^2/Amp^2
a	$11.8e^{-3}$	m
M_b	0.068	kg
g	9.81	m/s^2

Tabla 5.2: Parámetros del Levitador Magnético

A fin de controlar la posición de la bola se necesita controlar la corriente en el electromagneto, se diseña entonces el lazo de control para el electromagneto y el lazo de control para la posición de la bola.

La ecuación en espacio de estados para la corriente se reescribe como:

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\zeta}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \zeta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V$$

Con el fin de seguir una corriente deseada el lazo de control de la corriente se diseña usando

$$V = k_{ip} + k_{ii} \int (i - i_c)$$

Las ganancias de control se calculan con un algoritmo LQR y las matrices Q y R adecuadas obteniendo

$$k_i = \begin{bmatrix} k_{i1} & k_{i2} \end{bmatrix}$$

De la ecuación diferencial para la dinámica de la bola linealizada se obtiene la ecuación en forma de espacio de estados:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_b \\ \ddot{x}_b \\ \dot{\zeta}_{x_b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{2g}{x_{beq}+a} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ \dot{x}_b \\ \zeta_{x_b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2K_m M_b g}}{M_b(x_{beq}+a)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i$$

El lazo de control de la posición de la bola se implementa con:

$$i_c = k_1(x - x_c) - k_2\dot{x} - k_3 \int (x - x_c)$$

donde x es la posición de la bola en mm y x_c es la posición de la bola solicitada en mm .

Usando un regulador cuadrático con las matrices Q y R adecuadas, resulta en las ganancias

$$k = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \end{bmatrix}$$

Este lazo de control genera una corriente comandada para el lazo de control de corriente el cual se implementa como:

$$V = k_{i-1}(i - i_c) - k_{i2} \int (i - i_c)$$

siendo i la corriente medida e i_c la corriente impuesta por el lazo de la posición de la bola.

5.1. Sistemas de Control Helicóptero y Levitador Magnético en Red Ethernet

Los dispositivos de los sistemas de control son comunicados a través de una red Ethernet de 10 *Mbps*, para ello se emplea una configuración de NCS distribuida donde los sensores, actuadores y controladores son incorporados en nodos separados (Figura 5.2).

El helicóptero emplea 5 nodos de red para su sistema de control, 2 para los sensores, 2 para los actuadores y 1 para su controlador, mientras que el levitador magnético ocupa 4 nodos de red 2 para los sensores, 1 para el actuador y 1 para su controlador.

Sin embargo, dado que el controlador de la red únicamente modifica las frecuencias de transmisión, los nodos de los actuadores no se consideran en el modelo de frecuencias de transmisión resultando así la asignación de nodos para los dispositivos

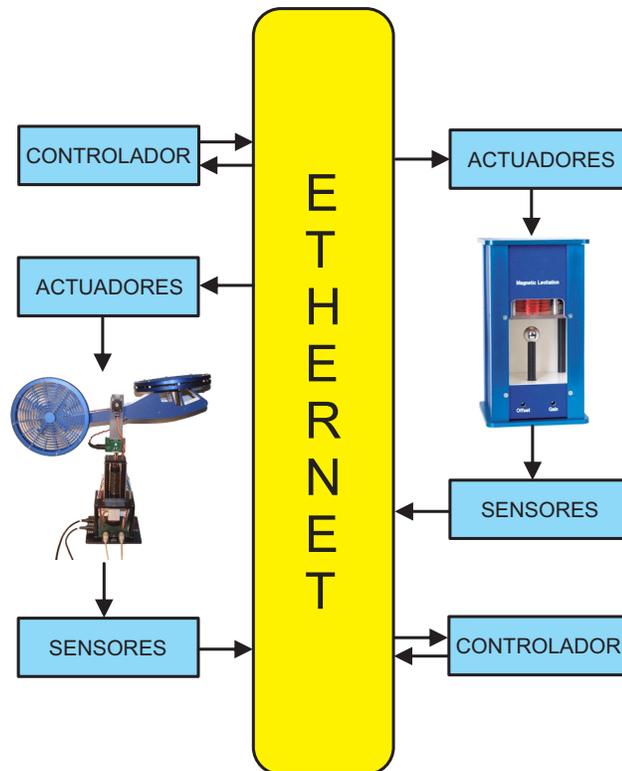


Figura 5.2: NCSs distribuidos en una Red Ethernet

de los sistemas de control en red de la siguiente forma (ver Fig. 5.3):

- el nodo 1 es asignado para el envío de datos del sensor de medición del ángulo de guiñado
- el nodo 2 es asignado para el envío de datos del sensor de medición del ángulo de cabeceo
- el nodo 3 es asignado para el envío de datos de la señal del controlador del helicóptero
- el nodo 6 es asignado para el envío de datos del sensor de posición de la bola del levitador

- el nodo 7 es asignado para el envío de datos del sensor de la corriente de la bobina
- el nodo 8 es asignado para el envío de datos de la señal de controlador del levitador

Los nodos 4 y 5 son reservados para los actuadores del helicóptero y el nodo 9 para el actuador del levitador magnético.

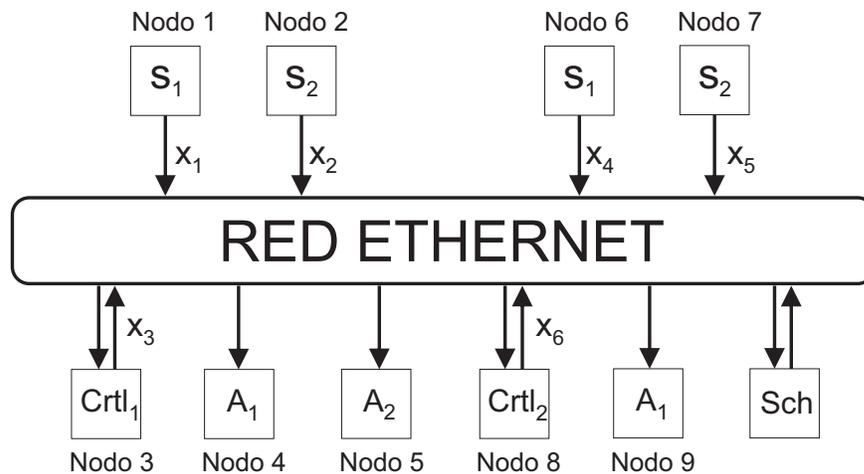


Figura 5.3: Asignación de nodos para los dispositivos de los NCSs

En la Figura 5.3 los nodos 1 y 2 envían la información del ángulo de guiñado y cabeceo respectivamente a través de la red al nodo 3, que es el nodo que ocupa el controlador del helicóptero, éste a su vez computa la acción de control y la envía mediante la red a los nodos 4 y 5 que ocupan los actuadores que son los motores que controlan las hélices de viaje e inclinación respectivamente. Los nodos 6 y 7 mandan por la red de comunicación el mensaje que contiene la posición de la bola y la lectura de la corriente de la bobina del levitador magnético al controlador que se ubica en el nodo 8 y una vez que este procesa la información que se necesita, la empaqueta y la envía a su actuador correspondiente que es electromagneto que se ubica en el nodo 9.

El objetivo es modificar en tiempo real las frecuencias de transmisión de los nodos de red para llevarlas a la región de planificabilidad que se establece previamente y fuera de línea.

Para llevar a cabo el control sobre red basado en la modificación de las frecuencias de transmisión de los nodos se hace la relación de los nodos con los estados del sistema de frecuencias desarrollado en el capítulo 4 como sigue (ver Figura 5.3):

Del sistema lineal de frecuencias de transmisión que se propone

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}$$

x_1 es la frecuencia de transmisión del nodo 1

x_2 es la frecuencia de transmisión del nodo 2

x_3 es la frecuencia de transmisión del nodo 3

x_4 es la frecuencia de transmisión del nodo 6

x_5 es la frecuencia de transmisión del nodo 7

x_6 es la frecuencia de transmisión del nodo 8

Mediante la acción de un controlador LQR se lleva a los estados del sistema de frecuencias a las regiones de planificabilidad \mathcal{L} las cuales son las referencias del sistema. Y se propone además la implementación de un filtro de Kalman debido al ruido en los sensores ¹.

5.2. Resumen

Para la comprobación del método de control sobre redes con base en frecuencias de transmisión se emplean dos sistemas de control, un sistema MIMO y un sistema SISO, ambos no lineales e inestables a lazo abierto. Y se describe el controlador que emplea cada sistema.

El sistema MIMO es un helicóptero de 2-GDL cuyas hélices son impulsadas por motores de CD y los ángulos de cabeceo y guiñado son medidos con encoders de

¹Ver Anexo B

alta resolución y el objetivo de control es estabilizar el helicóptero en los ángulos deseados.

El sistema SISO es un levitador magnético que consta de un electroimán y una bola de acero que descansa sobre un poste, la posición de la bola se mide con un sensor incorporado al poste y el objetivo de control es hacer levitar la bola y llevarla a una posición deseada.

Los sistemas son conectados a una red Ethernet de 10 *Mbps* donde intercambiarán información sus dispositivos de control. Se utiliza una configuración distribuida de NCS, es decir, los sensores, actuadores y controladores son incorporados en nodos separados.

Capítulo 6

Resultados

Para demostrar la efectividad del método de control sobre redes se modeló un sistema lineal para la modificación de frecuencias de los dos sistemas distribuidos, el helicóptero y el levitador magnético en una red Ethernet de 10 *Mbps*.

Se presentan las frecuencias máximas y mínimas obtenidas que delimitan las regiones de planificabilidad para cada nodo. Se diseñó el controlador LQR y el filtro de Kalman para el sistema.

Por último se realizaron pruebas bajo un ambiente de carga en la red Ethernet causada por las altas frecuencias de transmisión nominales de los agentes de los sistemas de control en red y un nodo adicional que transmite a alta frecuencia. La prueba se repitió, pero esta vez controlando las frecuencias de transmisión de los nodos de los sistemas de control en red y llevándolas a valores que pertenecen a la región de planificabilidad.

6.1. Sistema Lineal de frecuencias de transmisión

Se presentan los cálculos para definir las matrices del sistema de frecuencias conforme al procedimiento del capítulo 4 considerando que se modela para las frecuencias de transmisión de 6 nodos de red que ocupan los agentes de los sistemas de control en red.

De las frecuencias de transmisión mínimas obtenidas para cada nodo (Tabla 6.1) se tiene de (4.5) que $\Lambda = 5$ y de (4.6) los valores de la diagonal de la matriz A:

$$a_{11} = \frac{5}{40}, a_{22} = \frac{5}{45}, a_{33} = \frac{5}{50}, a_{44} = \frac{5}{175}, a_{55} = \frac{5}{165} \text{ y } a_{66} = \frac{5}{160}.$$

Los valores del consumo o utilización de la red para las tareas de los nodos es de $c_i = 0.001$. Y de (4.9) se obtiene el resto de los valores de la matriz A. El sistema lineal resultante es:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0.1250 & 0.1300 & 0.1350 & 0.1400 & 0.1450 & 0.1500 & 0 \\ 0.1060 & 0.1111 & 0.1160 & 0.1210 & 0.1260 & 0.1310 & 0 \\ 0.0900 & 0.0950 & 0.1000 & 0.1050 & 0.1100 & 0.1160 & 0 \\ 0.0135 & 0.0185 & 0.0235 & 0.0286 & 0.0335 & 0.0385 & 0 \\ 0.0105 & 0.0155 & 0.0205 & 0.0255 & 0.0303 & 0.0355 & 0 \\ 0.0065 & 0.0115 & 0.0165 & 0.0215 & 0.0265 & 0.0313 & 0 \\ 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 0.001 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 45 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 175 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 165 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 160 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} u + w$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x + v$$

El sistema es inestable ¹ ya que los valores propios obtenidos son

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 1 \\ \lambda_2 &= 0.3898 \\ \lambda_3 &= 0.0367 \\ \lambda_4 &= 0.0001 \\ \lambda_5 &= 0.0001 \\ \lambda_6 &= -0.0002 \\ \lambda_7 &= -0.0002 \end{aligned}$$

6.1.1. Controlador y Filtro de Kalman

El control se diseña considerando que se trata de un problema de seguimiento a las referencias que se introducen al sistema que en este caso son las frecuencias de transmisión de las regiones de planificabilidad. Por lo que se añaden integradores para hacer que la salida y siga la señal de referencia r , esto aumenta el sistema en

¹Ver Anexo A

un orden igual al número de señales de referencia [76].

La matriz de ganancias para el controlador LQR que se obtiene con

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 200 \end{bmatrix}$$

y

$$R = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

es

$$K = \begin{bmatrix} 0.6237 & 0.0027 & 0.0024 & 0.0007 & 0.0008 & 0.0008 & 0.0007 \\ 0.0031 & 0.5950 & 0.0022 & 0.0006 & 0.0007 & 0.0007 & 0.0007 \\ 0.0030 & 0.0025 & 0.5714 & 0.0005 & 0.0006 & 0.0006 & 0.0007 \\ 0.0031 & 0.0024 & 0.0018 & 0.4006 & 0.0002 & 0.0002 & 0.0008 \\ 0.0032 & 0.0024 & 0.0019 & 0.0002 & 0.4053 & 0.0002 & 0.0008 \\ 0.0032 & 0.0025 & 0.0020 & 0.0002 & 0.0002 & 0.4078 & 0.0008 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 4.0248 \end{bmatrix}$$

y la matriz de ganancia integral

$$K_I = \begin{bmatrix} -5.0787 & 0.0057 & 0.0100 & 0.0300 & 0.0306 & 0.0315 \\ -0.0055 & -5.0535 & 0.0043 & 0.0229 & 0.0235 & 0.0242 \\ -0.0100 & -0.0043 & -5.0326 & 0.0177 & 0.0182 & 0.0191 \\ -0.0303 & -0.0231 & -0.0177 & -4.8779 & 0.0003 & 0.0006 \\ -0.0310 & -0.0237 & -0.0183 & -0.0000 & -4.8822 & 0.0004 \\ -0.0318 & -0.0244 & -0.0192 & -0.0003 & -0.0001 & -4.8845 \\ 0.0036 & 0.0036 & 0.0036 & 0.0037 & 0.0037 & 0.0037 \end{bmatrix}$$

La matriz de ganancias del filtro de Kalman obtenida con las matrices W y V

$$W = V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

es

$$L = \begin{bmatrix} 1.1745 & 0.1603 & 0.1489 & 0.0841 & 0.0840 & 0.0830 & 0.0007 \\ 0.1603 & 1.1472 & 0.1364 & 0.0752 & 0.0752 & 0.0744 & 0.0007 \\ 0.1489 & 0.1364 & 1.1262 & 0.0681 & 0.0682 & 0.0681 & 0.0007 \\ 0.0841 & 0.0752 & 0.0681 & 1.0256 & 0.0261 & 0.0260 & 0.0005 \\ 0.0840 & 0.0752 & 0.0682 & 0.0261 & 1.0264 & 0.0266 & 0.0005 \\ 0.0830 & 0.0744 & 0.0681 & 0.0260 & 0.0266 & 1.0263 & 0.0005 \\ 0.0007 & 0.0007 & 0.0007 & 0.0005 & 0.0005 & 0.0005 & 2.4142 \end{bmatrix}$$

6.2. Región de planificabilidad

El cálculo de las cotas de la región de planificabilidad para la frecuencia de cada nodo se realizó fuera de línea mediante simulaciones con TrueTime y tomando como índice de desempeño el error integral absoluto para establecer las frecuencias de transmisión máximas y mínimas. La cota superior de la región de planificabilidad de

cada nodo está dada por las frecuencias máximas permitidas y están sujetas además a la restricción de utilización de la red

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{h_i} = \sum_{i=1}^n c_i f_i.$$

Las cotas inferiores de la región de planificabilidad son impuestas por el rendimiento del controlador de cada sistema de control en red, es decir, se investiga la frecuencia mínima de cada nodo que transmite en la red para el cual el sistema o los sistemas de control son estables, modificando la frecuencia de transmisión de los nodos de los sistemas control en red y verificando el IAE hasta llegar a los valores de frecuencias mínimas permitidas.

Por lo tanto se obtuvieron 6 regiones de planificabilidad que se muestran en la Tabla 6.1, los agentes $s_1 - s_3$ son los nodos de los sensores y el controlador del helicóptero y los agentes $s_1 - s_6$ corresponden a los nodos de los sensores y el controlador del levitador magnético. La utilización de la red o consumo se establece igual para todos los nodos para la red Ethernet empleada.

Agente	$c_i (s)$	$f_{nom}^i (Hz)$	$f_{min}^i (Hz)$	$f_{max}^i (Hz)$
s_1	0.001	280	40	83
s_2	0.001	300	45	98
s_3	0.001	310	50	70
s_4	0.001	450	175	212
s_5	0.001	480	165	196
s_6	0.001	500	160	188

Tabla 6.1: Frecuencias nominales, máximas, mínimas y tiempo de transmisión.

6.3. Helicóptero y Levitador Magnético

Las matrices de la representación en espacio de estados del helicóptero empleadas para calcular la matriz de ganancias del controlador son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -9.2593 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3.4868 \end{bmatrix}, & B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2.3611 & 0.0787 \\ 0.2401 & 0.7895 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

La matriz de ganancias de control obtenida es:

$$K = \begin{bmatrix} 18.9 & 1.98 & 7.48 & 1.53 & 7.03 & 0.770 \\ -2.22 & 19.4 & -0.45 & 11.9 & -0.770 & 7.03 \end{bmatrix} \tag{6.2}$$

Y para el levitador magnético las matrices de la representación en espacio de estados son:

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 943.2692 & 0 & -6.6429 \\ 0 & 0 & -26.6667 \end{bmatrix}, & B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.4242 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

La matrices de ganancias de control para este sistema son:

$$K_{PI} = \begin{bmatrix} 66.8388 & 23.3145 \end{bmatrix} \tag{6.4}$$

para el controlador PI que es para el lazo de la corriente y

$$K_{PIV} = \begin{bmatrix} -252.613 & -4.2879 & -248.0935 \end{bmatrix} \tag{6.5}$$

para el controlador PIV para el lazo de control de la posición de la bola.

6.4. Control sobre red Ethernet

Primeramente se plantea un escenario donde los agentes de los sistemas de control en red que son el helicóptero y el levitador magnético, transmiten con frecuencias de transmisión nominales (ver Tabla 6.1) en una red Ethernet (CSMA/CD) de 10 *Mbps*. Posteriormente utilizando el controlador LQR se efectúa el cambio de frecuencias nominales a las de la región de planificación mientras que el décimo nodo permanecerá transmitiendo y su frecuencia no será modificada.

Los elementos de los sistemas de control en red ocupan nueve nodos de acuerdo a la distribución que se explicó en el Capítulo 5 y un nodo adicional transmitirá en la red con frecuencia no controlada.

Debido a que las frecuencias de transmisión nominales de los nodos están por arriba de la cota de la región de planificabilidad tanto para el levitador magnético como para el helicóptero, se presenta saturación en la red y con ello la inestabilidad de los sistemas de control debido a que ocurren colisiones y retardos prolongados en las transmisiones como se muestra en la Figura 6.1. En donde la transmisión del nodo se representa con un valor alto, cuando tiene valor medio significa que la transmisión está en espera y cuando tiene un valor 0 denota que el nodo no transmite en la red.

En la misma figura los nodos 1 – 9 corresponden a la transmisión de los agentes distribuidos de los sistemas de control en red, los nodos 1 y 2 son los sensores del helicóptero, el nodo 3 su controlador y los nodos 4 y 5 los actuadores para los motores de las hélices. Los nodos 6 y 7 los ocupan los sensores del levitador magnético, el nodo 8 su controlador y el nodo 9 el actuador del levitador. Finalmente el nodo 10 representa la transmisión de un nodo no controlado.

Cuando el mecanismo (CSMA/CD) que emplea Ethernet para la resolución de contención del medio de comunicación detecta una colisión entre dos o más mensajes, detiene la transmisión de un nodo y espera una longitud de tiempo arbitrario para volver a intentar la transmisión. Si se presenta una gran cantidad de colisiones el tiempo de espera de un nodo para volver a intentar la transmisión puede ser muy prolongado como en el caso del nodo 2 de la Figura 6.1 que deja de transmitir por instantes de tiempo muy prolongados hasta que logra nuevamente retransmitir.

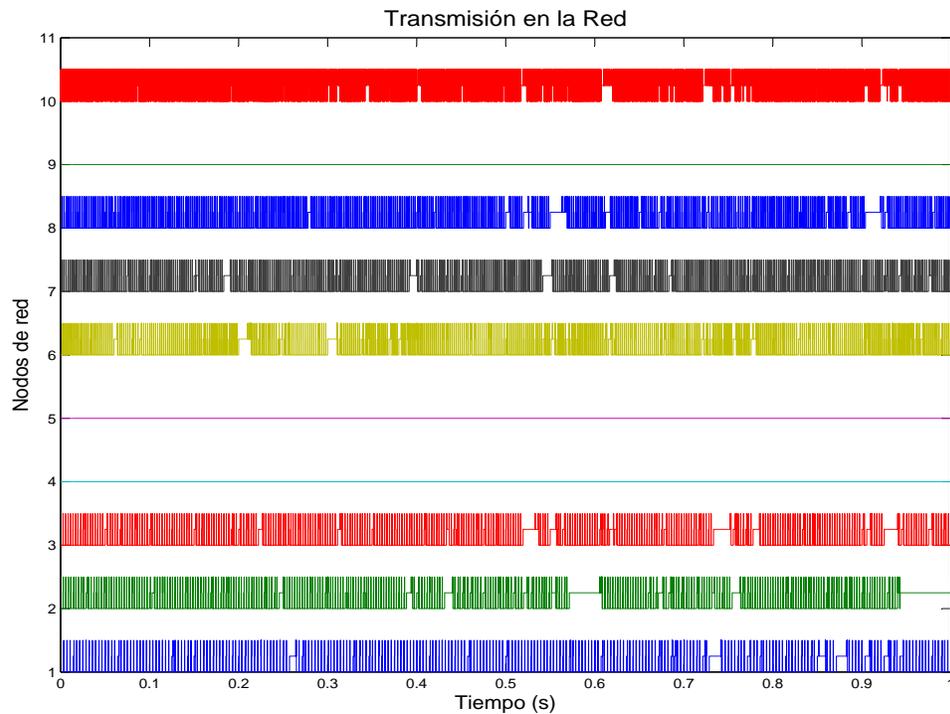


Figura 6.1: Transmisión en la red con frecuencias nominales

Estos retardos de tiempo prolongados en la entrega de los mensajes causan la inestabilidad de los sistemas de control en red ya que los datos entregados tardíamente ya no corresponden a la acción de control que se requiere en el tiempo en que el mensaje es recibido o bien se realizan cálculos erróneos debido a que se efectúan con información retrasada o incluso los paquetes que se envían en la red ya han sido desechados. En la Figura 6.2 se observa que, la señal de cabeceo y guiñado del helicóptero no logran seguir la trayectoria deseada pues los mensajes no son entregados en el tiempo que se requieren.

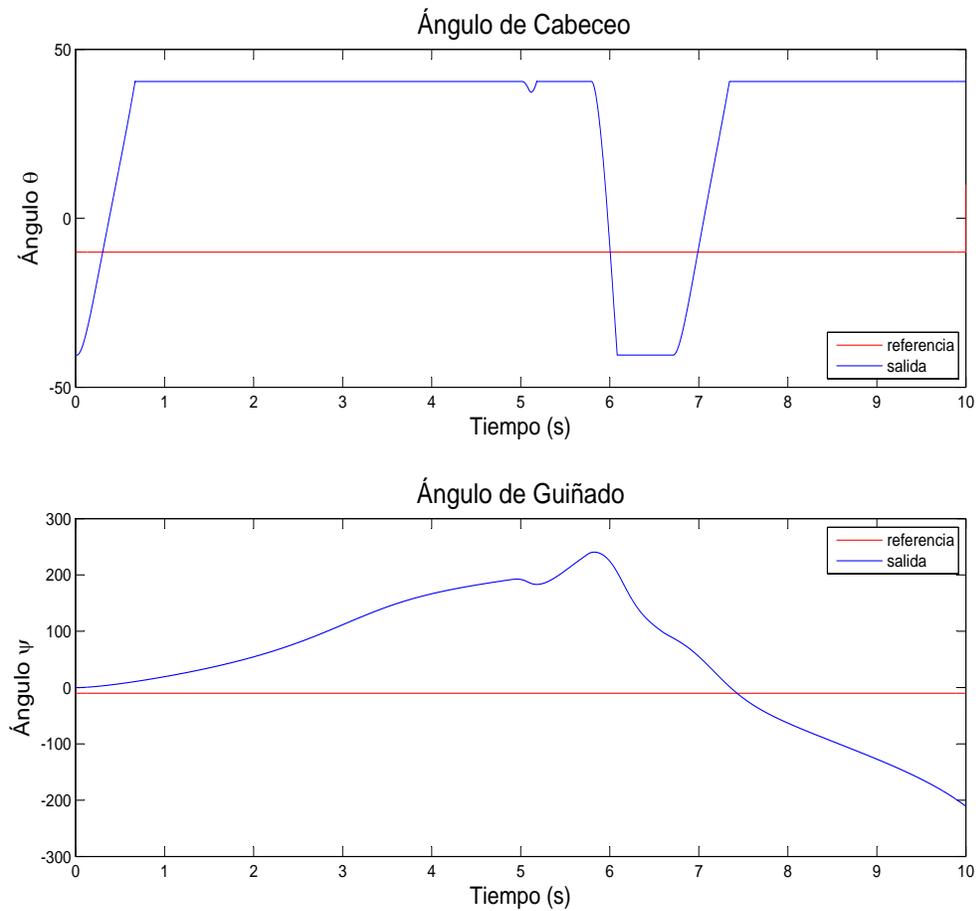


Figura 6.2: Señal de cabeceo y guiñado del helicóptero cuando se transmite con frecuencias nominales.

El mismo efecto ocurre en el levitador magnético mostrado en la Figura 6.4; los retardos producidos por las colisiones de los mensajes provocan la inestabilidad del sistema y ya no le es posible al controlador del levitador llevar a la bola de acero a la posición deseada.

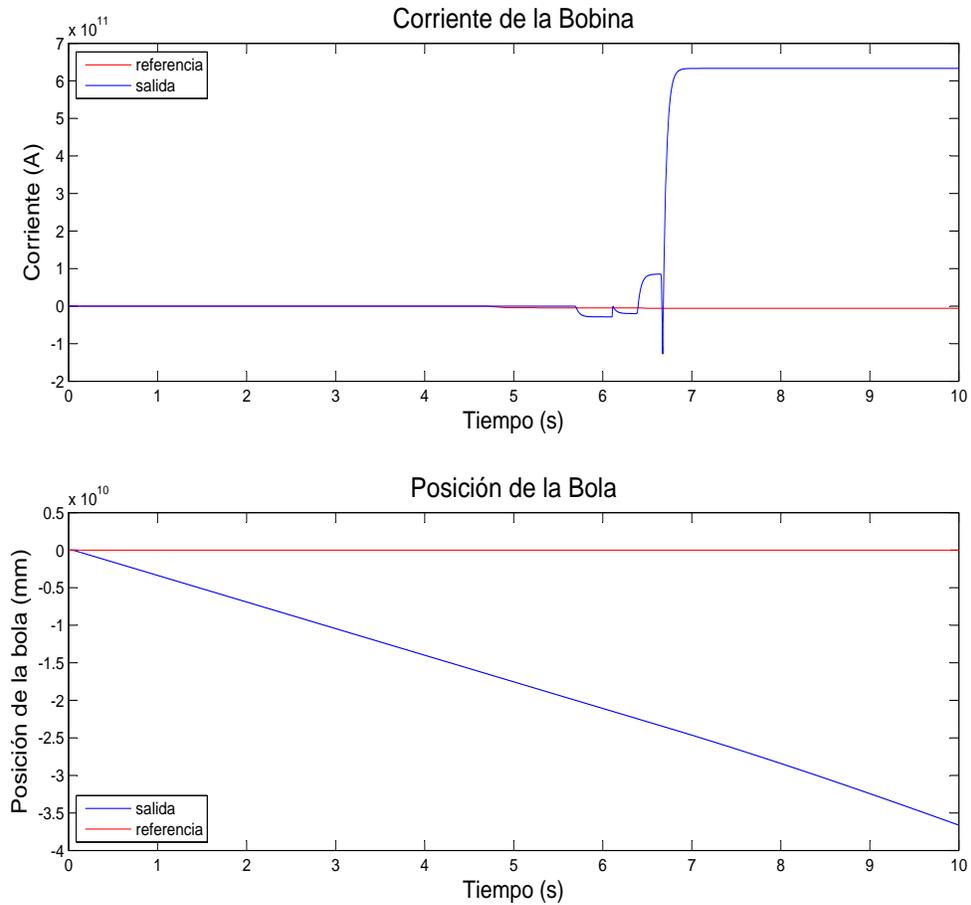


Figura 6.3: Corriente de la bobina y posición de la bola del levitador cuando se transmite con frecuencias nominales

A continuación se emplea el controlador LQR que se diseñó para el modelo de frecuencias de transmisión, para modificar los valores hasta llevarlos a la cota superior de la región de planificabilidad (ver Tabla 6.1) y para tratar el ruido blanco en las mediciones de las frecuencias de la red se emplea el filtro de Kalman.

La acción del controlador se tiene en la Figura 6.4 el sistema tiene valores iniciales igual a los valores de las frecuencias de transmisión nominales y el controlador ajusta

las frecuencias a los valores correspondientes de la cota superior de las regiones de planificabilidad. Las señales x_1 y x_2 son las frecuencias de transmisión de los nodos 1 y 2 que corresponden a los sensores del helicóptero, x_3 es la frecuencia de transmisión del nodo 3 que se ha asignado al controlador del helicóptero. Las señales x_4 y x_5 son las frecuencias de transmisión de los sensores del levitador que ocupan los nodos 6 y 7 en la red y finalmente x_6 es la frecuencia de transmisión del controlador del levitador que tiene asignado el nodo 8 en la red de comunicación.

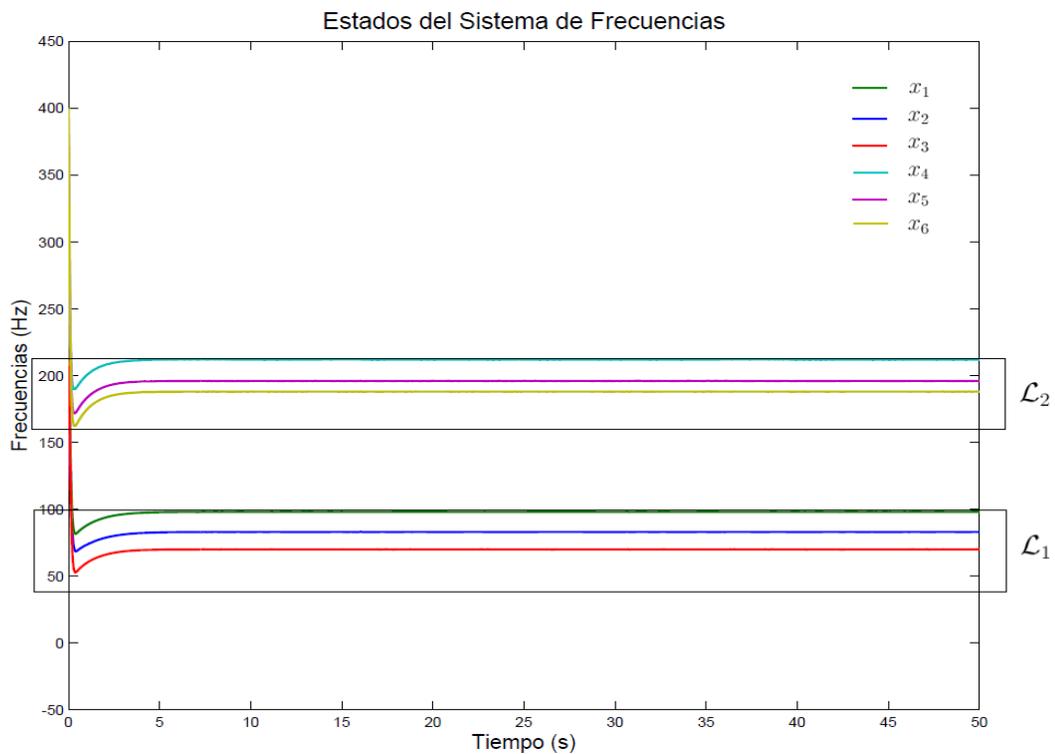


Figura 6.4: Controlador llevando a las frecuencias de transmisión a la región de planificabilidad

Las frecuencias de transmisión mínimas y máximas que forman las regiones de planificabilidad para cada uno de los nodos de los sistemas de control en red mostradas en la Tabla 6.1, se pueden representar en este caso con 2 regiones de planificabilidad globales, una para el helicóptero y otra para el levitador magnético referidas como \mathcal{L}_1 y \mathcal{L}_2 respectivamente en la Figura 6.4.

Con los nuevos valores de las frecuencias de transmisión se logra disminuir tanto la carga en la red como las colisiones de mensajes esto se ve en la Figura 6.5 de esta manera el mecanismo que emplea Ethernet para la resolución de contención del medio de comunicación no tarda una longitud grande de tiempo para la retransmisión aleatoria del nodo que deja de transmitir cuando se produce una colisión debido al envío de datos no controlado del nodo 10.

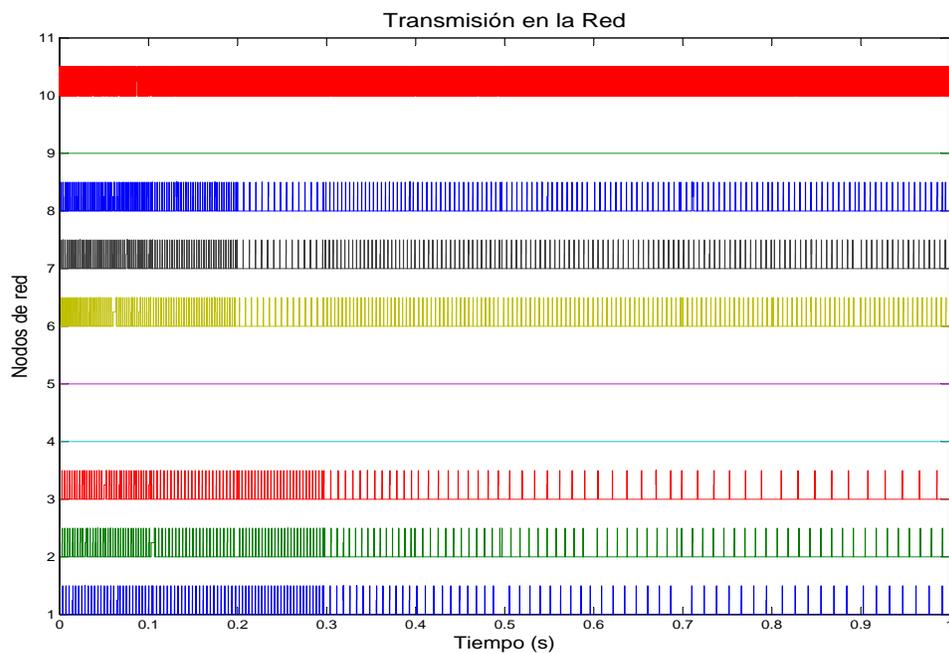


Figura 6.5: Transmisión de los nodos de red con frecuencias dentro de la región de planificabilidad

Al inicio de la transmisión se producen colisiones debido a que todos los nodos envían información simultáneamente a través de la red de comunicación con frecuencias que provocan carga en la red como se observa en el tiempo $0 < t < 0.3$, en el que la transmisión de los nodos 1,2,3,6,7 y 8 en ocasiones tienen valores medios, lo que significa que en algún momento el envío de datos se pone en espera pues la red está siendo ocupada por otro nodo que ganó la contienda por el canal de comunica-

ción y una vez que se libera el canal termina la espera y retransmite cambiando a un valor alto.

La transición de las frecuencias de transmisión a los nuevos valores se ve claramente al comparar las gráficas de la transmisión en la red y los estados del sistema lineal en los primeros instantes de tiempo que tarda en alcanzar los valores deseados como se muestra en la Figura 6.6.

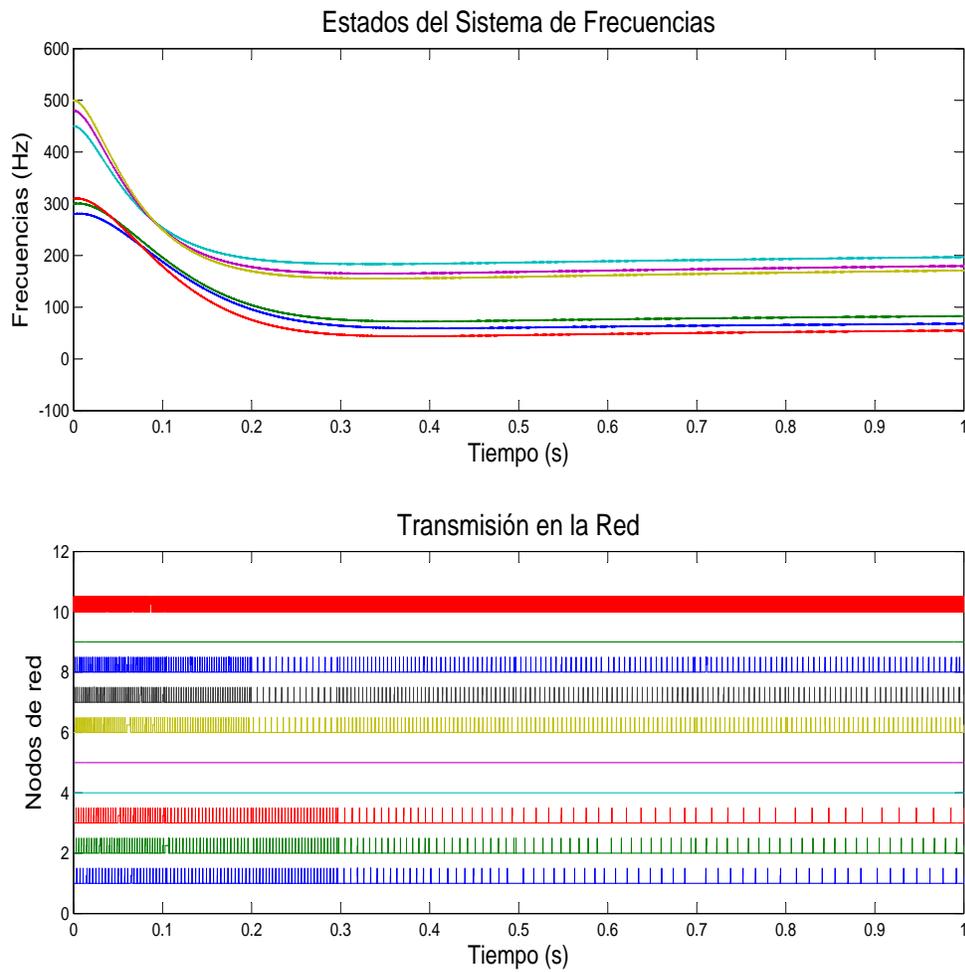


Figura 6.6: Estados del Sistema Lineal vs Transmisión de los nodos de red

El mínimo de colisiones y retardos en la transmisión son factores esenciales para la comunicación y permite que se mantenga la estabilidad de los sistemas de control en red como se denota en la Figura 6.7 que representan las señales de cabeceo y guiñado respectivamente.

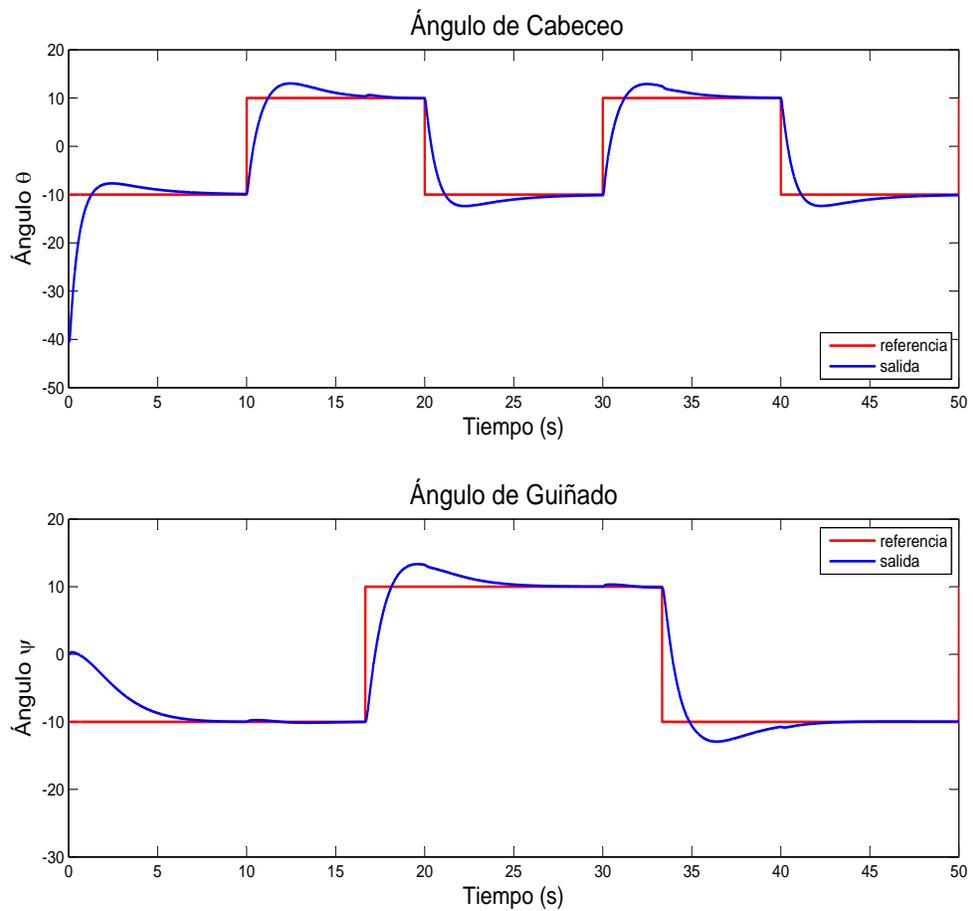


Figura 6.7: Señal de cabeceo y guiñado cuando se transmite con frecuencias dentro de la región de planificabilidad

La respuesta de la corriente del levitador magnético y la posición deseada de la bola se muestra en la Figura 6.8, donde se observa que se efectúa el seguimiento para la corriente y la señal de la posición de la bola solicitada manteniendo la estabilidad del sistema.

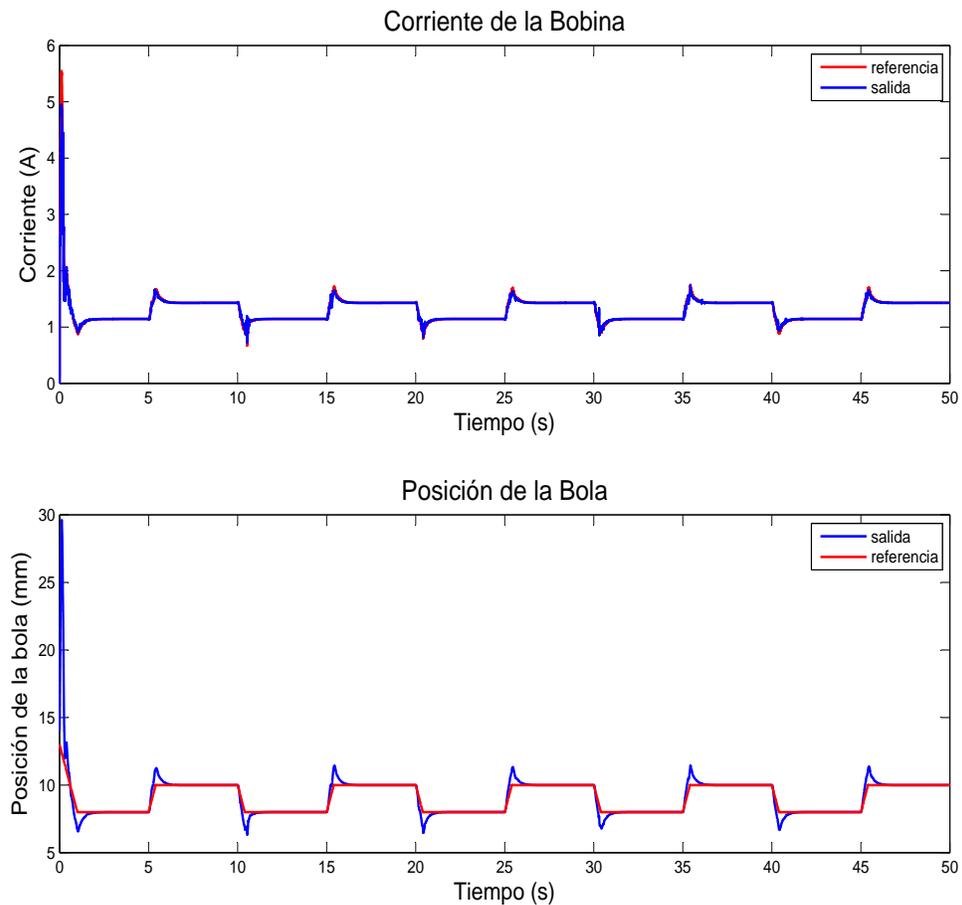


Figura 6.8: Respuesta de la corriente de la bobina del levitador magnético y posición de la bola cuando se transmite con frecuencias dentro de la región de planificabilidad

El nodo 10 que transmite con alta frecuencia puede causar colisiones con los mensajes de los nodos controlados, sin embargo, al mecanismo de Ethernet (CSMA/CD)

no le tomará un tiempo demasiado prolongado para resolver el problema de la contención por el medio de comunicación. Por lo tanto no causará la inestabilidad de los sistemas de control pues el tráfico en la red ha disminuido al mantener las frecuencias de transmisión dentro de las regiones de planificabilidad.

Con las nuevas frecuencias de transmisión seleccionadas con el controlador LQR la utilización de la red de los nodos controlados es menor que 1 por lo que se cumple la restricción de planificación o utilización (ecuación 4.1), como se aprecia en la Figura 6.9

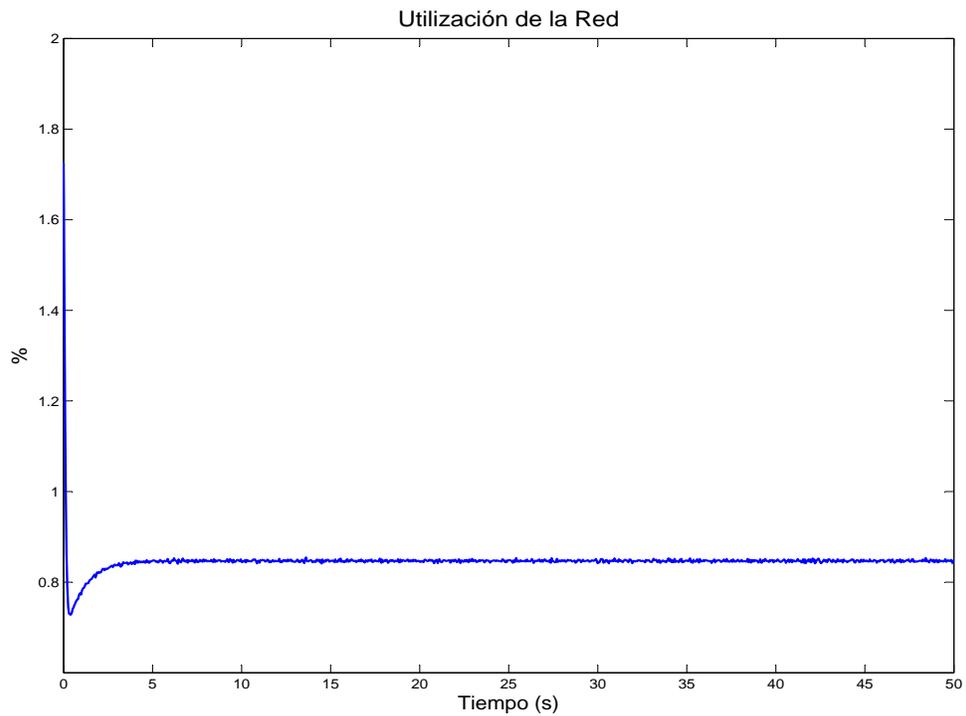


Figura 6.9: Utilización de la red de los nodos con frecuencias controladas.

6.5. Resumen

En este capítulo se muestran los valores de las regiones de planificación obtenidas para los sistemas de control en red que son el helicóptero y el levitador magnético y las matrices del sistema lineal invariante en el tiempo que representan a las frecuencias de transmisión en red.

Se realiza la simulación del control sobre la red empleando *Matlab* y *TrueTime* y eligiendo una red Ethernet (CSMA/CD) de 10 *Mbps*, los agentes de los sistemas de control en red transmiten primeramente a las frecuencias nominales causando la inestabilidad de los sistemas de control debido a la saturación de la red y los largos tiempos de espera para que el mecanismo (CSMA/CD) de Ethernet realice la retransmisión para un nodo que deja de transmitir debido a las colisiones que se generan.

Con un controlador LQR para el sistema de frecuencias de transmisión se lleva las salidas a la región de planificabilidad y con el filtro de Kalman se trata el ruido que se presenta en las mediciones, se repite el experimento logrando esta vez la estabilidad de los sistemas de control y el cumplimiento de la condición de utilización de la red.

A pesar de que en el experimento la frecuencia de transmisión de un nodo no es controlada y transmite con frecuencia muy alta, no afecta el rendimiento de los sistemas de control en red ya que se preserva la condición de utilización de la ecuación 4.1.

Capítulo 7

Conclusiones

La estrategia de control propuesta sobre redes basada en la modificación de las frecuencias de transmisión presenta la ventaja de preservar la estabilidad de los sistemas de control en red aun ante escenarios donde redes como Ethernet presentan las mayores desventajas como son las altas cargas de red o tráfico.

Comparado con otros protocolos de red, Ethernet tiene desventajas cuando se presentan altas cargas en la red, sin embargo, si se realiza una planificación adecuada del medio de comunicación es posible utilizar esta arquitectura de red como medio de comunicación para sistemas de control en red. Se demostró lo anterior con dos sistemas de control transmitiendo en una red Ethernet (CSMA/CD) de 10 *Mbps*, los sistemas son un helicóptero de 2 grados de libertad y un levitador magnético de QUANSER. La presencia de un segundo sistema de control en la misma red junto con la transmisión a alta frecuencia de otro nodo produce tráfico en la red no obstante con la planificación y la modificación de las frecuencias de transmisión es viable el uso de Ethernet para la comunicación entre los agentes o elementos de los sistemas de control sin impactar negativamente en el rendimiento de los controladores de los sistemas.

El manejo de las frecuencias de transmisión permite reducir el número de colisiones de mensajes que ocurren en el medio de comunicación y en el caso de una red como Ethernet (CSMA/CD) representa una ayuda para que su mecanismo solucione la contención simultánea de los nodos por el medio de comunicación sin requerir una longitud de tiempo grande que resulte en la inestabilidad de los sistemas de control

en red.

Modelar las frecuencias de transmisión como un sistema lineal y emplear un controlador LQR para la modificación de las frecuencias de transmisión en línea y un filtro de Kalman para tratar el ruido blanco en las mediciones garantiza mantener la transmisión dentro de la región de planificabilidad y asegura la estabilidad de los sistemas de control en red.

Existe una relación entre la estabilidad del modelo de frecuencias de transmisión y la estabilidad de los sistemas de control en red. Se requiere además la sincronización entre dichos sistemas.

Se observa un vínculo entre la estabilidad de los sistemas de control en red y la planificación por lo que se plantea la posibilidad de demostrar si un sistema de control estable es también planificable y sobre qué método de planificación y qué medio de comunicación.

Con un sistema lineal de frecuencias de transmisión existe la posibilidad de automatizar la red de comunicación para uno o más sistemas de control en red. Sin embargo, sigue siendo necesario el total conocimiento de los sistemas de control que se desee comunicar a través de la red, es decir, conocer la región de planificabilidad en la cuál cada sistema es estable.

Como trabajo futuro se deberá diseñar controladores que contemplen las imperfecciones en la red y realizar un codiseño con la estrategia de planificación presentada para así solucionar problemas como pérdidas de paquetes y desecho de datos entre otros.

Así mismo, falta realizar la prueba matemática para comprobar teóricamente la estabilidad de los sistemas de control en red que utilicen este tipo de planificación y establecer un teorema para calcular las regiones de planificabilidad que logran la QoS y QoP de los sistemas de control utilizados ya que esto facilitará el procedimiento para la planificación presentada en este trabajo de tesis. Y establecer matemáticamente la relación entre planificación y estabilidad de un sistema de control en red.

Anexos

Anexo A

Controlabilidad y Observabilidad ¹

Estabilidad

El sistema dinámico $\dot{x} = Ax$ se dice que es estable si todos los eigenvalores de A están en el semiplano izquierdo abierto; esto es, $Re\lambda(A) < 0$. Una matriz A con tal propiedad se dice que es estable o Hurwitz.

El sistema dinámico de la ecuación (A.1), o el par (A, B) , se dice que es estabilizable si existe una retroalimentación de estado $u = Fx$ tal que el sistema es estable (es decir, $A + BF$ es estable).

Controlabilidad

Considérese la ecuación de estados de dimensión n y p entradas

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{A.1}$$

donde A y B son, respectivamente, matrices reales constantes de $n \times n$ y $n \times p$.

La ecuación (A.1) o el par (A, B) se dice que es controlable si para cualquier estado inicial $x(0) = x_0$ y cualquier estado final x_1 , existe una entrada que transfiere x_0 a x_1 en un tiempo finito. De otra manera (A.1) o (A, B) se dice que no es controlable.

Teorema 1 *El par n -dimensional (A, B) es controlable si la matriz de controlabili-*

¹Basado en [76], [77] y [78].

dad $n \times np$

$$C = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B]$$

tiene rango n .

Observabilidad

Considere la ecuación de estados

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \tag{A.2}$$

donde A , B , C , y D son, respectivamente, $n \times n$, $n \times p$, $q \times n$, y $q \times p$ matrices constantes.

La ecuación (A.2) se dice que es observable si para cualquier estado inicial desconocido $x(0)$, existe un tiempo finito $t_1 > 0$ tal que el conocimiento de la entrada u y la salida y sobre $[0, t_1]$ es suficiente para determinar únicamente el estado inicial $x(0)$. De otra manera, (A.2) se dice que es no observable.

Teorema 2 *El par n -dimensional (A, C) es observable si la matriz de observabilidad $nq \times n$*

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

tiene rango n .

Anexo B

LQR y Filtro de Kalman¹

Regulación Cuadrática Lineal

En la Figura B.1 se muestra la configuración para el problema de Regulación Cuadrática Lineal LQR (Linear Quadratic Regulation).

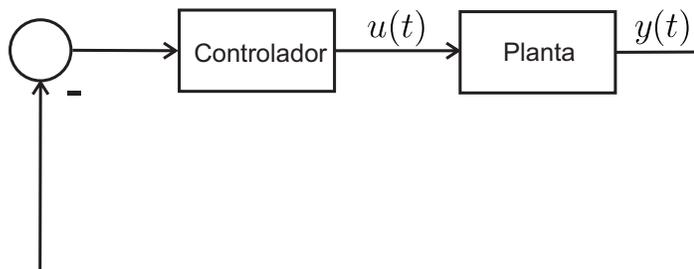


Figura B.1: Configuración para Regulación Cuadrática Lineal(LQR).

En esta configuración el modelo de espacio de estados de la planta o proceso es de la forma

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (\text{B.1})$$

El método de LQR se basa en encontrar la entrada de control $u(t)$, $t \in [0, \infty)$ que minimiza el criterio:

$$J_{LQR} := \int_0^{\infty} x^T(t)Qx(t) + Ru^T(t) dt$$

¹Basado en [76], [77], [78] y [79]

La solución del problema de optimización planteado es:

$$u(t) = -kx(t) = -R^{-1}B^T Px(t)$$

Donde la matriz P se obtiene de la ecuación algebraica de Riccati:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$$

Es decir, la ley de control óptima resulta ser una realimentación de estados en la que la ganancia de realimentación se obtiene de la ecuación algebraica de Riccati.

Filtro de Kalman

Uno de los principales usos de observadores en la práctica es estimar el estado de un sistema en presencia de mediciones ruidosas. Para la evaluación de los estados estimados \hat{x} se considera el modelo en espacio de estados:

$$\dot{x} = Ax + Bu + w$$

$$y = Cx + v$$

donde w y v son variables aleatorias correspondientes a un ruido blanco o ruido gaussiano que representan lo siguiente:

- w : las perturbaciones que pueden presentarse en el sistema real
- v : los errores de medición que se presentan

y satisface:

$$E [ww^T] = W$$

$$E [vv^T] = V$$

donde W y V son las matrices de covarianza para la perturbación w y la medición del ruido v .

El observador de kalman para el vector de estados tiene la estructura básica de un observador. Por lo que la ecuación que describe el observador es:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x})$$

Siendo \hat{x} el vector de estados estimado y L la matriz de diseño del estimador. Si las señales w y v no están correlacionadas, el valor de L se determina mediante la fórmula:

$$L = PC^TV^{-1}$$

Donde P es la solución de la ecuación algebraica de Riccati:

$$AP + PA^T - PC^TV^{-1}CP + W = 0$$

La ecuación de Riccati en este caso tiene su origen en la minimización de la función de costo:

$$J = \int_0^{\infty} [(x(t) - \hat{x}(t))(x(t) - \hat{x}(t))]^T dt$$

La manera de implementar el controlador LQR y el filtro de Kalman se da en la Figura (B.2):

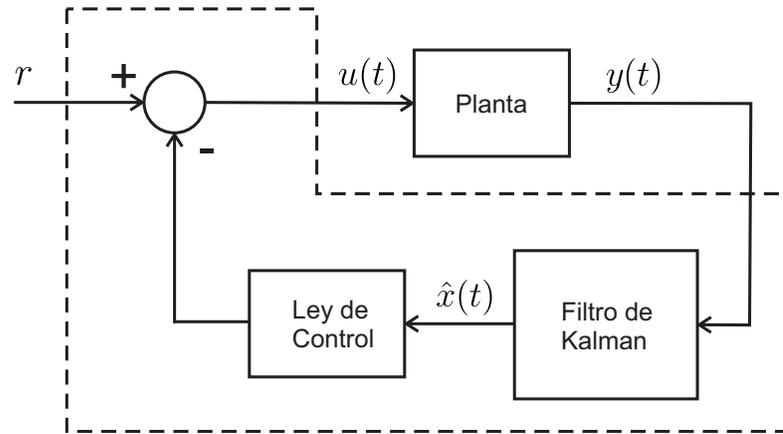


Figura B.2: Esquema de controlador LQR con filtro de Kalman.

Bibliografía

- [1] J.P. Thomesse. *Fieldbus Technology in Industrial Automation*. Proceedings of the IEEE, vol. 93 (6), pp. 1073–1101, junio 2005.
- [2] C. Cardeira, Z. Mammeri. *A Schedulability Analysis of Tasks and Network Traffic in Distributed Real-time Systems*. Measurement, The Journal of the International Measurement Conference IMEKO, Elsevier, 15 (2), pp. 71–83, 1995.
- [3] J. A. Stankovic. *Strategic Directions in Real-time and Embedded Systems*. ACM Computing Surveys, 28 (4), pp. 751–763, 1996.
- [4] Y. Halevi, A. Ray. *Integrated Communication and Control Systems: Part I-Analysis*. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 110, no. 4, pp. 367–373, 1988.
- [5] A. Ray, Y. Halevi. *Integrated Communication and Control Systems: Part II-Design Consideration*. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 110, no. 4, pp. 3374–381, 1988.
- [6] T. Rahkonen. *Distributed Industrial Control Systems—A critical Review Regarding Openness*. Control Engineering Practice, Vol. 11, no. 10, pp. 1155–1162, 1995.
- [7] U. Ozguner, H. Goktas, H. Chan, J. Winkelman, M.Liubakka, R. Krtolica. *Automotive Suspension Control Through a Computer Communication Network*. IEEE Conference on Control Applications, vol. 2, pp. 895–900, 1992.
- [8] P. Seiler, R. Sengupta. *Analysis of Communication Losses in Vehicle Control*

- Problems*. In Proceedings of the 2001 American Control Conference, vol. 2, pp. 1491–1496, junio 2001.
- [9] F. Goktas, J.M. Smith, R. Bajcsy. *Telerobotics Over Communication Networks* Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, California USA. vol. 3, pp. 2399–2404, diciembre 1997.
- [10] Feng-Li Lian, James R. Moyne, Dawn M. Tilbury. *Implementation of Networked Machine Tools in Reconfigurable Manufacturing Systems*. Proceedings of the 2000 Japan-USA Symposium on Flexible Automation, Ann Arbor, Michigan USA, julio 2000.
- [11] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, Y. Xu. *A Survey of Recent Results in Networked Control Systems*. Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 138–162, enero 2007.
- [12] Linda G. Bushnell. *Networks and Control*. IEEE Control Systems Magazine, vol. 21 (1), pp. 22–23, febrero 2001.
- [13] R. S. Raji. *Smart networks for control* IEEE Spectrum, pp. 49–54, junio 1994.
- [14] Y. Koren, Z.J. Pasek, A.G. Ulsoy, U. Benchetrit. em Real-Time Open Control Architectures and System Performance. CIRP Annals Manuf. Technol., vol. 45, no. 1, pp. 377–380, 1996.
- [15] E. Méndez Monroy. *Codiseño de Sistemas de Control en Red Compensando Imperfecciones Acotadas de Tiempo Inducidas por la Red*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- [16] A. T. Al-Hammouri, M. S. Branicky, V. Liberatore, S.M. Phillips. *Decentralized and Dynamic Bandwidth Allocation in Networked Control Systems*. 20th International Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006.
- [17] Gadi Kaplan. *Ethernet's Winning Ways*. IEEE Spectrum, vol. 38, no. 1, pp. 113–115, enero 2001.

-
- [18] Sandro Zampieri. *Trends in Networked Control Systems* Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, pp. 2886–2894, julio 6–11, 2008.
- [19] Wojciech Grega. *Challenges and Paradigms in Applied Robust Control*. InTech, noviembre 2011.
- [20] Yodyium Tipsuwan, Mo-Yuen Chow. *Control methodologies in networked control systems*. Control Engineering Practice, Vol. 11, No. 10, pp. 1099–1111, febrero 2003.
- [21] Giorgio C. Butazzo. *Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications*. Springer, 2005.
- [22] C. L. Liu and J. W. Layland. *Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment*. Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 20, No. 1, pp. 46–61, enero 1973.
- [23] Wei Zhang. *Stabilty Analysis of Nerworked Control Systems*. Tesis Ph.D., Case Western Reserve University, 2001.
- [24] Jane W. S. Liu. *Real-Time Systems*. Prentice Hall, 2000.
- [25] Johan Nilsson. *Real-Time Control Systems with Delays*. Tesis Ph.D, Dept. Automatic Control. Lund Institute of Technology, 1998.
- [26] Rachana A. Gupta, Mo-Yuen Chow. *Networked Control Systems: Overview and Research Trends*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57(7), pp. 2527–2535, 2010.
- [27] John Baillieul, Panos J. Antsaklis. *Control and Communication Challenges in Networked Real-Time Systems*. Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 1, pp. 9–28, enero 2007.
- [28] A. Gambier. *Real-time Control Systems: A Tutorial*. 5th Asian Control Conference vol. 3, pp. 1024–1031, 2004.

-
- [29] D. A. Mellichamp. *Real-Time Computing with Applications to Data Acquisition and Control*. 1st ed., Ontario, Canada: Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
- [30] Kun Ji. *Real-Time Control Over Networks*. Tesis Ph.D, Texas A&M University, mayo 2006.
- [31] George Coulouris, Jean Dollimore, Tim Kindberg. *Distributed Systems: Concepts and Design*. Addison–Wesley, junio 2005.
- [32] John A. Stankovic, Chenyang Lu, Son S.H., Gang Tao. *The Case for Feedback Control Real-Time Scheduling*. Proceedings of the 11th Euromicro Conference on, pp. 11–20, 1999.
- [33] Giorgio C. Buttazzo. *Rate Monotonic vs. EDF: Judgment Day*. Real–Time Systems, Vol. 29, pp. 5–26 2005.
- [34] Feng-Li Lian, Moyne, James R., Tilbury, D.M. *Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet* IEEE Control Systems Magazine, 21(1), pp. 66–83, febrero 2001.
- [35] S.A. Koubias, G.D. Papadopoulos. *Modern Fieldbus Communication Architectures for Real-time Industrial Applications*. Computers in Industry, vol.26, pp. 243–252, 1995.
- [36] J. D. Spragins, J. L. Hammond, K. Pawlikoski. *Telecommunications: Protocols and Design*. Addison-Wesley, 1991.
- [37] Hubert Zimmermann. *OSI Reference Model-The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection*. IEEE Transactions on Communications, vol. 28, no. 4, pp. 489–496, abril 1980.
- [38] W. Richard Stevens. *TCP illustrated*. Addison-Wesley Professional Computing Series, 1993.
- [39] J. M. Lee, S. Lee, M. H. Lee, K. S. Yoon. *Integrated Wiring System for Construction Equipment*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics Vol. 4 (2), pp. 187–195, junio 1999.

-
- [40] P. Sink. *A Comprehensive Guide to Industrial Networks*. Sensors, vol. 18, no. 6, pp. 28–43, 2001.
- [41] A. C. Weaver, J. Luo, X. Zhang. *Monitoring and control using the Internet and Java* IEEE International Conference IECON, vol. 3, San Jose, CA, pp. 1152–1158, 1999.
- [42] A. Malinowski, T. Konetski, B. Davis, and D. Schertz. *Web-Controlled Robotic Manipulator Using Java and Client-Server Srchitecture*. IEEE International Conference IECON, vol. 3, San Jose, CA, pp. 827–830, 1999.
- [43] Y. Tipsuwan, M.-Y. Chow. *Fuzzy Logic Microcontroller Implementation for DC Motor Speed Control*. IEEE International Conference IECON, vol. 3, San Jose, CA, pp. 1271–1276, 1999.
- [44] R. Zurawski. *Verifying Correctness of Interfaces of Design Models of Manufacturing Systems Using Functional Abstractions*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, pp. 307–320, junio 1997.
- [45] Andrews S. Tanenbaum, David J. Wetherall. *Computer Networks*. Prentice Hall, fifth edition, 2011.
- [46] Li Li, Fei-Yue Wang. *Control and Communication Synthesis in Networked Control Systems*. International Journal of Intelligent Control and Systems, vol. 13, no. 2, pp. 81–88, junio 2008.
- [47] T. C. Yang. *Networked Control System: a Brief Survey*. IEE Proceedings Control Theory and Applications, vol. 153, no.4, pp. 403–412, julio 2006.
- [48] Zhihong Huo, Huajing Fang, Changlin Ma. *Networked Control System: State of the Art*. Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, China, Vol. 2, pp. 1319–1322, junio 2004.
- [49] Gregory C. Walsh, Hong Ye, Linda G. Bushnell. *Stability Analysis of Networked Control Systems*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 10, no. 3, pp. 438–446, mayo 2002.

-
- [50] Qiang Ling, Michael D. Lemmon. Soft Real-time Scheduling of Networked Control Systems with Dropouts Governed by a Markov Chain. IEEE Proceedings of the American Control Conference, Denver Colorado, pp. 4845–4850, junio 2003.
- [51] Seung Ho Hong. *Scheduling Algorithm of Data Sampling Times in the Integrated Communication and Control Systems*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 3, no. 2, pp. 225–230, junio 1995.
- [52] Dong-Sung Kim, Young Sam Lee, Wook Hyun Kwon, Hong Seong Park. *Maximum allowable delay bounds of networked control systems*. Control Engineering Practice, vol. 11, pp. 1301–1313, 2003.
- [53] A. R. Teel, Nesić. *Input-Output Stability Properties of Networked Control Systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 10, pp. 1650–1667, octubre 2004.
- [54] A. R. Teel, Nesić. *Input-to-State Stability of Networked Control Systems*. Automatica, vol. 40 (12), pp. 2121–2128, 2004.
- [55] Mo-Yuen Chow, Yodyium Tipsuwan. *Gain Adaptation of Networked DC Motor Controllers Based on QOS Variations*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, No. 5, pp. 936–943, octubre 2003.
- [56] Gregory C. Walsh, Octavian Beldirnan, Linda Bushnell. *Error Encoding Algorithms for Networked Control Systems*. IEEE Proceedings of the 38th Conference on Decision and Control, Phoenix, Arizona USA, pp. 4933–4938, 1999.
- [57] Chen Peng, Dong Yue, Zhou Gu, Feng Xia. *Sampling period scheduling of networked control systems with multiple-control loops*. Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 79, pp. 1502–1511, 2008.
- [58] Feng-Li, Jonh Yook, Paul Otanez, Dawn Tilbury, James Moyne. *Design of Sampling and Transmission Rates for Achieving Control and Communication Performance in Networked Agent Systems*. Proceedings of the American Control Conference, pp. 3329–3334, 2003.

-
- [59] A. Menéndez-Leonel de Cervantes, H. Benítez Pérez. *Scheduling Strategy for Real-Time Distributed Systems*. Journal of Applied Research and Technology, vol. 8, no. 2, pp. 177–185, agosto 2010.
- [60] Esquivel Oscar, Benítez Héctor, Méndez Erick, Menéndez Antonio. *Frequency Transition for scheduling management using dynamic system approximation for a kind of NCS*. ICIC Express Letters, part B: Applications, Vol. 1, Num. 1, pp. 39–98, 2010.
- [61] Wei Zhang, Michael S. Branicky, Stephen M. Phillips. *Stability of Networked Control Systems*. IEEE Control Systems Magazine, pp. 84–99, febrero 2001.
- [62] Anton Cervin, Dan Henriksson, Bo Lincoln, Johan Eker, Karl-Erik Arzén. *How Does Control Timing Affect Performance? Analysis and Simulation of Timing Using Jitterbug and TrueTime*. IEEE Control Systems Magazine, vol. 23 (3), pp. 16–30, junio 2003.
- [63] L. Almeida, R. Pasadas, J. A. Fonseca. *Using a Planning Scheduler to Improve the Flexibility of Real-Time Fieldbus Networks*. Control Engineering Practice vol.7 (1), pp. 101–108, enero 1999.
- [64] O. Dolejs, Z. Hanzalek. *Simulation of Ethernet for Real-Time Applications*. IEEE International Conference on Industrial Technology, vol. 2, pp. 1018–1021, 2003.
- [65] D. Hutchison. *Ethernet for real-time applications*. IEE Proceedings, vol. 134, part E no. 1, pp. 47–53, 1987.
- [66] W. Lawrenz. *CAN System Engineering From Theory to Practical Applications*. Springer, 1997.
- [67] A. Kutlu, H. Ekiz, E.T. Powner. *Performance Analysis of MAC Protocols for Wireless Control Area Network*. In Proceedings of the Second International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, Beijing, China, pp. 494–499, junio 1996.

-
- [68] Max Felsler. *Real-Time Ethernet Industry Prospective*. Proceedings of the IEEE, Vol. 93, no. 6, pp. 1118–1128, junio 2005.
- [69] Anton Cervin, Johan Eker. *Feedback Scheduling of Control Task*. IEEE Conference on Decision and Control, Vol. 5, pp. 4871–4876, 2000.
- [70] David M. Auslander, Jean-Dominique Decotignie. *Handbook of Networked and Embedded Control Systems*. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 52(1), pp. 145–148, enero 2007.
- [71] *DeviceNet Specification*. Open DeviceNet Vendor Association, Boca Raton, Florida, 2001.
- [72] Quanser Inc. *2-DOF Helicopter Reference Manual*. Quanser Innovate Educate, 2006.
- [73] Garo Zarikian, Andrea Serrani. *External Model-Based Disturbance Rejection in Tracking Control of Euler-Lagrange Systems*. Proceedings American Control Conference, Vol. 5, pp. 3562–3567, 2005.
- [74] Quanser Inc. *Magnetic Levitation Experiment*. Quanser Consulting, 2006.
- [75] Alain Yetendje, Maria M. Seron, José A. De Doná, John J. Martínez. *Sensor fault-tolerant control of a magnetic levitation system*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 20, pp. 2108–2121, 2010.
- [76] Chi-Tsong Chen. *Linear System Theory and Design*. Oxford University Press, tercera edición, 1999.
- [77] Karl J. Amstrom, Richrad M. Murray. *Feedback Systems*. Princeton University Press, 2009.
- [78] Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall, tercera edición, 1993.
- [79] J. P. Hespanha. *Linear Systems Theory*. Princeton University Press, 2009.