

Joint Platoon Control and Resource Allocation for NOMA-V2V Communication System: A Comparative Analysis of Vehicle Dynamics Impact

Jorge Apud, Patricio Hinostroza

Abstract—El *platooning* vehicular cooperativo, apoyado en comunicaciones V2V fiables, es crucial para los Sistemas de Transporte Inteligente modernos. Es por esto que tanto la gestión eficiente de recursos de comunicación, como la asignación NOMA, es vital para mantener la estabilidad del pelotón bajo restricciones de red realistas. Este trabajo analizó el efecto de incorporar un modelo vehicular de tercer orden con limitación explícita de *jerk* dentro de un marco conjunto de control de *platooning* y comunicaciones V2V basado en NOMA. Se replicó íntegramente la arquitectura de un modelo cinemático simplificado y se comparó su desempeño frente a un nuevo modelo dinámico bajo idénticas condiciones de red y perturbación del líder. Los resultados mostraron que el modelo con *jerk* acotado produjo trayectorias significativamente más suaves en aceleración, velocidad y espaciamiento, reduciendo las oscilaciones transitorias y mejorando la estabilidad en régimen permanente. A pesar de su mayor realismo dinámico, el modelo propuesto requirió un menor número de transmisiones y redujo el consumo total de energía en comunicaciones en un 19% y 25 % respectivamente, evidenciando que acciones de control más suaves pueden disminuir la demanda sobre el canal. En conjunto, los resultados demostraron que NOMA se mantuvo eficaz bajo un modelo vehicular más realista y destacaron la importancia de considerar límites físicos de actuadores en estudios de co-diseño entre control y comunicaciones.

Index Terms—NOMA-V2V, Platooning, Vehicular Dynamics, Jerk-Limited Control, Distributed Control, Resource Allocation.

I. INTRODUCCIÓN

EL control cooperativo de formaciones vehiculares (*platooning*) constituye un pilar fundamental de los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS) modernos. Mediante la mantención de distancias reducidas entre vehículos y la coordinación de velocidades, se reduce el consumo energético, aumenta la capacidad vial, mejora seguridad, reducen tráfico, entre otros [?], [?].

Para garantizar la estabilidad de pelotón, *string stability*, es imperativo contar con un controlador eficaz que opere sobre una red de comunicación Vehículo-a-Vehículo (V2V) de alta fiabilidad [?]. Esto plantea una dependencia crítica entre el desempeño del control y la disponibilidad de recursos espectrales [?]. Una red deficiente, caracterizada por latencias estocásticas o pérdida de paquetes, puede degradar la calidad del control, llevando a oscilaciones peligrosas o incluso colisiones.

Los autores son estudiantes de la Pontificia Universidad Católica de Chile (emails: patricio.hinostrozav@uc.cl, japud@uc.cl).

A. Desafíos en la Gestión de Recursos

La proliferación exponencial de dispositivos conectados en el Internet de las Cosas (IoT) ha generado una presión creciente sobre las bandas de comunicación limitadas. Como se señala en [?], sin una gestión de recursos rigurosa, la comunicación V2V se vuelve propensa a interferencias y congestión, haciendo difícil satisfacer los estrictos requisitos de latencia y tasa de actualización necesarios para el control de pelotones.

La importancia de la gestión de potencia en canales con interferencia fue establecida tempranamente por Kandukuri y Boyd [?], quienes demostraron que minimizar la probabilidad de interrupción (*outage probability*) es equivalente a maximizar el margen de la relación señal-a-interferencia (SIR). En el contexto vehicular, se extendió este análisis en [?], evidenciando que las interrupciones de comunicación obligan a aumentar el tiempo de *headway* para mantener la seguridad, reduciendo así la eficiencia del tráfico.

En este contexto, diversos estudios han explorado la integración de técnicas avanzadas de comunicación con esquemas de control distribuido. En [?] abordaron el control resiliente y escalable de vehículos conectados, proponiendo estrategias para mitigar incertidumbres en la topología de la red. Sin embargo, su enfoque asume a menudo condiciones de canal ideales.

Desde la perspectiva de la asignación de recursos, en [?] se aborda la optimización conjunta de recursos de radio y control en redes LTE-V2V. Su enfoque se basó en tecnologías de Acceso Múltiple Ortogonal (OMA), donde los recursos de tiempo y frecuencia se dividen exclusivamente entre usuarios para evitar interferencia. Si bien esto simplifica el diseño, Posteriormente se demostró que los esquemas OMA sufren de una baja eficiencia espectral en escenarios de alta densidad vehicular, limitando la escalabilidad del sistema [?].

Para superar las limitaciones de OMA, trabajos recientes [?] exploran la adopción de técnicas de Acceso Múltiple No Ortogonal (NOMA). NOMA permite multiplexar múltiples usuarios en el mismo recurso de tiempo-frecuencia diferenciándolos en el dominio de la potencia [?], [?]. Así, [?] presenta un marco conjunto de control distribuido y asignación de recursos NOMA que modela de manera explícita la relación entre el error de espaciamiento actual y la frecuencia de comunicación requerida, logrando una eficiencia superior a los esquemas OMA tradicionales.

No obstante, la gran mayoría de trabajos en co-diseño de

control y comunicaciones, incluyendo [?], [?], [?], utilizan modelos cinemáticos de segundo orden simplificados. En estos modelos, la aceleración se considera una entrada de control directa que puede cambiar instantáneamente. Esta asunción ignora la dinámica real del actuador (motor/frenos), la masa del vehículo y, crucialmente, las restricciones de *jerk* (tasa de cambio de aceleración).

Estudios en dinámica vehicular [?] y análisis de calidad de conducción autónoma [?] enfatizan que violar los límites de *jerk* (típicamente $< 0.9 \text{ m/s}^3$ para confort) genera comportamientos inaceptables para los pasajeros y físicamente irrealizables por los actuadores mecánicos, limitando la aplicabilidad de estos esquemas de control.

El presente trabajo replica fielmente el algoritmo NOMA-V2V planteado en [?] y extiende su formulación mediante un modelo dinámico de tercer orden ($F = ma$, $\dot{F} = u$), imponiendo restricciones explícitas de *jerk*. El objetivo es comparar cuantitativamente ambos modelos bajo la misma arquitectura de red, respondiendo:

- ¿Qué costo adicional de comunicación implica adherirse a un modelo dinámico físicamente realizable?
- ¿Cómo afecta la limitación de *jerk* a la convergencia del error de espaciamiento?
- ¿Qué diferencias emergen en los perfiles de aceleración y velocidad resultantes?
- ¿Es NOMA una solución robusta para absorber la carga de comunicación adicional impuesta por modelos más realistas?

II. MARCO GENERAL DEL SISTEMA

A. Arquitectura de Comunicación NOMA-V2V

El sistema utiliza comunicación V2V unicast en un esquema TDMA. Siguiendo a [?], hasta $O_{\max} = 2$ vehículos pueden transmitir en el mismo *timeslot* utilizando NOMA de dominio de potencia.

El receptor está equipado con capacidad de Cancelación Sucesiva de Interferencia (SIC). Esto permite que un vehículo decodifique primero la señal de interferencia dominante (si esta es lo suficientemente fuerte), la sustraiga de la señal recibida y posteriormente decodifique su propia señal. Esta capacidad es fundamental para permitir la superposición de usuarios sin degradar la fiabilidad del enlace crítico.

La condición de éxito para el vehículo i en el instante t depende de la Relación Señal-a-Interferencia-más-Ruido (SINR) post-cancelación:

$$\Gamma_i^t = \frac{o_i^t p_i^t h_{i,i-1}^t}{I_i^t + N_0} \geq \Gamma_{\text{th}} \quad (1)$$

donde h es la ganancia del canal y I_i^t es la interferencia residual.

B. Agendamiento Basado en Eventos

La demanda de comunicación no es estática. Se calcula en función del error de espaciamiento absoluto:

$$e_{i,p}^t = p_{i-1}^t - p_i^t - d - l.$$

Si $|e_{i,p}^t| > e_{\text{th}}$, el vehículo solicita recursos. La frecuencia de asignación f_i se escala proporcionalmente a la magnitud del error relativo a la capacidad máxima de corrección del vehículo en un periodo T .

III. MODELOS VEHICULARES COMPARADOS

Se analizan dos formulaciones para el diseño del controlador predictivo.

A. Cinemático

Este modelo asume que el sistema de control vehicular puede imponer una aceleración objetivo instantáneamente como el utilizado en el *Baseline* [?].

$$v_i^{t+1} = v_i^t + u_i^t \Delta t, \quad (2)$$

$$p_i^{t+1} = p_i^t + v_i^t \Delta t + \frac{1}{2} u_i^t (\Delta t)^2. \quad (3)$$

Aquí, la entrada de control es $u_i^t \equiv a_i^t$. Las restricciones son simplemente $a_{\min} \leq u_i^t \leq a_{\max}$.

Este modelo permite cambios de aceleración tipo escalón, lo que implica un *jerk* infinito teórico y fuerzas instantáneas imposibles de generar por un motor real.

B. Dinámico Propuesto

Para capturar la inercia y el confort, se introduce la fuerza longitudinal F_i como variable de estado, con lo que se limita el *jerk*.

$$F_i^{t+1} = F_i^t + u_i^t \Delta t, \quad (4)$$

$$a_i^{t+1} = F_i^{t+1} / m, \quad (5)$$

$$v_i^{t+1} = v_i^t + a_i^{t+1} \Delta t, \quad (6)$$

$$p_i^{t+1} = p_i^t + v_i^t \Delta t + \frac{1}{2} a_i^{t+1} (\Delta t)^2. \quad (7)$$

La nueva entrada de control es $u_i^t = \dot{F}$, que representa la tasa de cambio de fuerza. Dado que $a = F/m$, esto controla directamente el *jerk*:

$$\text{jerk} \approx \frac{u_i^t}{m}.$$

Las restricciones se amplían para incluir límites de confort según [?]:

$$F_{\min} \leq F_i \leq F_{\max} \quad (\text{Límite Motor/Freno}) \quad (8)$$

$$|u_i^t|/m \leq 0.9 \text{ m/s}^3 \quad (\text{Límite Confort}) \quad (9)$$

IV. CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO (QP)

Cada vehículo resuelve un problema de optimización local en cada paso de tiempo para minimizar el error de seguimiento futuro proyectado.

$$\min_{u_i^t} (e_{i,est}^{t+1})^T W (e_{i,est}^{t+1}) \quad (10)$$

Para el **Modelo A**, la proyección es cuadrática estándar. Para el **Modelo B**, derivamos una nueva relación de predicción. El error futuro $e(t+1)$ depende cúbicamente del tiempo respecto a la entrada de control u (*jerk*):

$$e_p^{t+1} \approx e_p^t + e_v^t \Delta t + \frac{1}{2} a^t \Delta t^2 + \frac{\Delta t^3}{6m} u_i^t.$$

La matriz \mathbf{A} que relaciona la entrada u con el estado futuro $[p, v, a]^T$ es:

$$\mathbf{A}_{dyn} = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta t^3}{2m_b} \\ -\frac{\Delta t^2}{m} \\ -\frac{\Delta t}{m} \end{bmatrix}$$

Esto penaliza implícitamente los cambios rápidos, actuando como un filtro paso bajo mecánico.

V. MÉTODO DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS

El problema de optimización global se desacopla en dos etapas secuenciales para reducir la complejidad computacional: agendamiento de usuarios (dominio del tiempo) y asignación de potencia (dominio de la potencia) [?]. Además, se incorpora un estimador de estado para manejar los instantes sin comunicación.

A. Etapa 1: Agendamiento de Usuarios (User Scheduling)

El objetivo es determinar la distribución temporal exacta de los slots para minimizar el intervalo de actualización. Primero, se determina la frecuencia de comunicación requerida f_i según la magnitud del error de espaciamiento. Luego, se calcula el intervalo promedio de slots c_i entre dos transmisiones consecutivas para el vehículo i :

$$c_i = \begin{cases} 0 & \text{si } |e_{i,p}| \leq e_{th} \\ \max\left(1, \left\lfloor \frac{T}{f_i} \right\rfloor\right) & \text{si } |e_{i,p}| > e_{th} \end{cases} \quad (11)$$

El algoritmo intenta asignar el slot ideal $t_{ideal} = t_{last} + c_i$. Si este slot ya está ocupado por el máximo de usuarios (O_{max}), se emplea un algoritmo de búsqueda en forma de “Z” para encontrar el candidato disponible más cercano :

$$C_{search} = \{t_{ideal}-1, t_{ideal}+1, t_{ideal}-2, t_{ideal}+2, \dots\} \quad (12)$$

Este mecanismo prioriza la periodicidad necesaria para garantizar la frescura de la información (VoI) mientras gestiona la congestión del canal.

El procedimiento detallado para determinar los slots de transmisión se describe formalmente en el Algoritmo 1, el cual prioriza a los vehículos con mayor error para asignarles una frecuencia f_i adecuada.

subsectionEtapa 2: Asignación de Potencia NOMA Una vez definidos los usuarios que comparten un slot, se deben determinar sus potencias. Para ello, se aplica el **Teorema 1** demostrado en [?]:

En un sistema V2V, el orden óptimo de decodificación SIC que minimiza el consumo total de potencia es el orden ascendente de la ganancia del canal de interferencia.

Esto implica que el usuario que sufre la interferencia más fuerte (desde el transmisor del otro par) debe ser decodificado primero. Para un par de usuarios j y k , si $h_{j,k-1} < h_{k,j-1}$, el usuario k decodifica primero a j . Las potencias se calculan de manera “voraz” para satisfacer estrictamente el umbral R^{th} :

Algorithm 1 Agendamiento de Usuarios (User Scheduling)

Entrada: Error de espaciamiento $|e_{i,p}|$, umbral de error e^{th} , último slot agendado t_l , longitud del periodo de agendamiento T .

Salida: Esquema de agendamiento del usuario O_i .

- 1: **procedimiento** AGENDAMIENTO DEL MV i EN UN PERIODO
- 2: Inicializar esquema de agendamiento $O_i = 0$.
- 3: **if** $|e_{i,p}| \leq e^{th}$ **then**
- 4: Terminar.
- 5: **else**
- 6: Inicializar número asignado $a = 0$, siguiente slot deseado $t_n = 1$, f_i según Ec. (10), $c_i = \frac{T}{f_i}$.
- 7: **if** $(t_l + c_i) \bmod T > T$ **then**
- 8: $t_n = (t_l + c_i) \bmod T$.
- 9: **end if**
- 10: **while** $a \leq f_i$ o $t_n \leq T$ **do**
- 11: **if** t_n puede ser agendado **then**
- 12: $O_i^{t_n} = 1$.
- 13: $a = a + 1$.
- 14: $t_n = t_n + c_i$.
- 15: **else**
- 16: Inicializar arreglo de slots candidatos C (búsqueda en Z).
- 17: Actualizar t_n como el primer slot disponible en C .
- 18: **end if**
- 19: **end while**
- 20: **end if**
- 21: **fin procedimiento**

$$p_j = \frac{R^{th} N_0}{h_{j,j-1}} \quad (13)$$

$$p_k = \frac{R^{th} (N_0 + p_j h_{k,j-1})}{h_{k,k-1}} \quad (14)$$

Donde $h_{k,j-1}$ es la ganancia de interferencia desde el transmisor de j hacia el receptor de k . Si la suma $p_j + p_k > P_{max}$, se declara un *outage* y no se realiza la transmisión.

B. Mecanismo de Estimación de Estado

Dado que el agendamiento no es continuo, el sistema requiere un estimador para los instantes t donde no hay recepción de paquetes. Siguiendo a [?], el vehículo i estima el estado de su predecesor $i-1$ basándose en la última información recibida en $t' < t$, asumiendo persistencia del input de control $u_{i-1}(t')$:

$$v_{est}^t = v(t') + u(t')(t - t')\Delta t \quad (15)$$

$$p_{est}^t = p(t') + v(t')(t - t')\Delta t + \frac{1}{2}u(t')((t - t')\Delta t)^2 \quad (16)$$

Estas estimaciones alimentan al controlador QP, permitiendo mantener la estabilidad de la cuerda incluso bajo la intermitencia inherente al protocolo de asignación de recursos. —

HASTA ACA CREO QUE ESTA BIEN

VI. SIMULACIONES Y RESULTADOS

A. Configuración del Experimento

Se simula un pelotón de $N = 12$ vehículos en MATLAB.

- Parámetros Físicos: $\Delta t = 10$ ms, $m = 1500$ kg.
- Parámetros de Red: $BW = 180$ kHz, $N_0 = -174$ dBm/Hz, Potencia máx = 35 dBm.

1) *Escenario de prueba y transferencia de la trayectoria del líder*: Para comparar de forma justa el desempeño del modelo cinemático original y del modelo dinámico con *jerk* acotado, se adopta un esquema de testeo en dos etapas. En una primera simulación se ejecuta únicamente el modelo dinámico de tercer orden, utilizando al líder como generador de trayectoria. Como la entrada de control del líder ya no es la aceleración longitudinal $u_0(t)$, sino el *jerk*, la perturbación se introduce como un *jerk* constante y negativo durante un intervalo, seguido por un lazo de control PD sencillo sobre la velocidad.

Más precisamente, el líder parte en régimen estacionario a velocidad de crucero v_{cruise} . Durante un breve intervalo inicial se mantiene $j_0(t) = 0$ para preservar ese estado. A continuación, en la ventana temporal de perturbación se fija un *jerk* constante $j_0(t) = \frac{j_{\min}}{10} < 0$, lo que produce una reducción suave de la fuerza longitudinal y, por ende, una desaceleración progresiva del líder sin saltos bruscos de aceleración. Finalizado este pulso, se cierra un controlador PD en el dominio de la fuerza

$$\dot{F}_0(t) = K_p(v_{\text{cruise}} - v_0(t)) - K_d a_0(t),$$

Durante esta primera simulación se registra la aceleración longitudinal del líder en cada instante de muestreo, construyendo una secuencia discreta. Al finalizar, dicha secuencia se almacena en un archivo externo que actúa como “tabla de consulta” de la trayectoria del líder.

En una segunda simulación se ejecuta el modelo cinemático de referencia, idéntico al utilizado en el trabajo base, pero forzando al líder a reproducir exactamente el mismo perfil de aceleración generado por el modelo dinámico. En cada paso de simulación se aplica directamente como entrada de control cinemática la aceleración previamente registrada.

Con esta estrategia, ambos modelos son sometidos a una perturbación externa idéntica en términos de aceleración y velocidad del líder, pero cada uno la procesa según su propia dinámica interna. La comparación de errores de espaciamiento, esfuerzo de control y métricas de comunicación se realiza así sobre un escenario común, evitando sesgos asociados a trayectorias del líder distintas y aislando el efecto de pasar de un modelo cinemático ideal a uno dinámico con *jerk* limitado.

B. Análisis Comparativo

1) *Estabilidad y error*: En la Figura 1 se muestra la evolución del error de espaciamiento por vehículo para el modelo dinámico con limitación explícita de *jerk*, mientras que las Figuras 2 y 3 muestran, respectivamente, la velocidad de los vehículos y el error absoluto promedio. La perturbación introducida en la trayectoria del líder genera una onda de desaceleración que se propaga hacia la cola del pelotón, pero

dicha onda es suave: los errores de espaciamiento presentan variaciones continuas y sin esquinas, alcanzan un máximo cercano a 0.5 m de manera agregada y de 1.2 m en el peor vehículo, luego decrecen de forma monótona hasta estabilizarse en un valor estacionario del orden de los centímetros. La curva de velocidades es igualmente suave, con perfiles casi superpuestos entre vehículos, lo que indica que el controlador local y la dinámica de tercer orden permiten que el pelotón recupere la velocidad de crucero sin oscilaciones de alta frecuencia. Finalmente, en la Figura 4 se presenta la evolución de los paquetes acumulados recibidos correctamente a lo largo del horizonte de simulación.

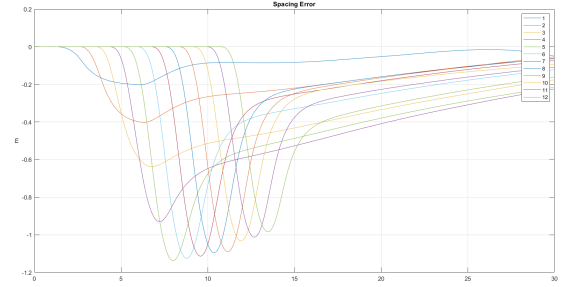


Fig. 1. Evolución del error de espaciamiento por vehículo (modelo dinámico).

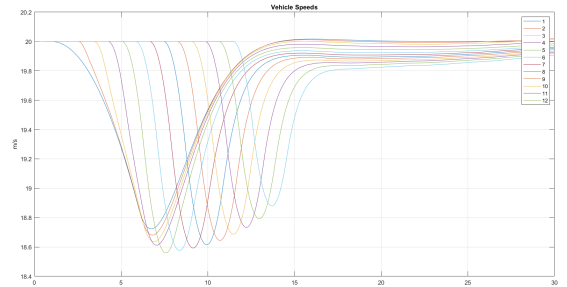


Fig. 2. Evolución de la velocidad por vehículo (modelo dinámico).

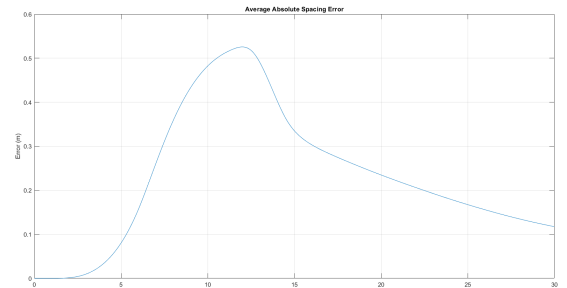


Fig. 3. Evolución del error de espaciamiento absoluto promedio (modelo dinámico).

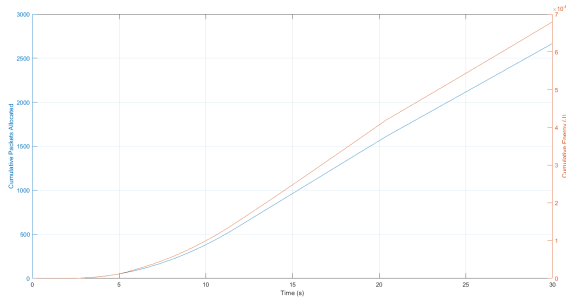


Fig. 4. Paquetes acumulados recibidos correctamente (modelo dinámico).

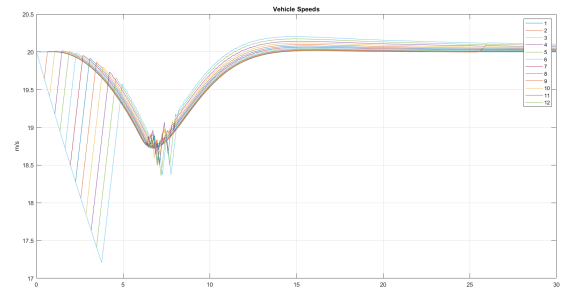


Fig. 6. Evolución de la velocidad por vehículo (modelo cinemático).

En contraste, las Figuras 5 y 6 corresponden al modelo cinemático original del *paper*. En este caso, los cambios de aceleración son abruptos y se traducen en perfiles de velocidad con tramos fuertemente angulados, evidenciando saltos en la aceleración aplicada a los vehículos. Los errores de espaciamiento (Fig. 5) muestran trayectorias que se estabilizan en un error estacionario mayor, del orden de 0.2m frente a 0.1m del modelo dinámico, como se aprecia en la Figura 7. Además, la propagación de la perturbación es menos suave y tiende a dejar diferencias persistentes entre vehículos.

Desde el punto de vista de estabilidad, ambos modelos logran mantener el pelotón cohesionado ante la perturbación, pero el modelo dinámico con *jerk* acotado presenta una respuesta claramente más amortiguada: el máximo error de espaciamiento es similar o ligeramente menor, el error absoluto promedio decrece más rápido después del tránsito de la onda y el estado estacionario presenta menores desalineamientos entre vehículos. Al mismo tiempo, la ausencia de esquinas en las trayectorias de velocidad y espaciamiento refleja un comportamiento físicamente más realista y confortable para los pasajeros.

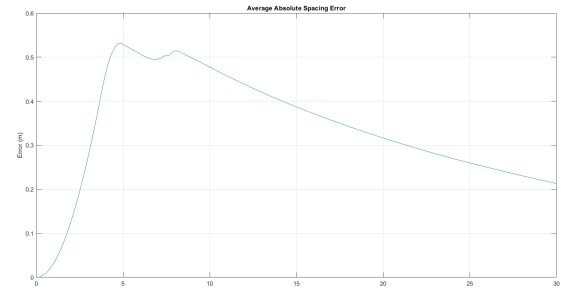


Fig. 7. Evolución del error de espaciamiento absoluto promedio (modelo cinemático).

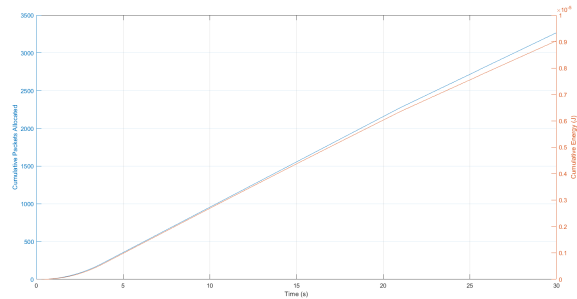


Fig. 8. Paquetes acumulados recibidos correctamente (modelo cinemático).

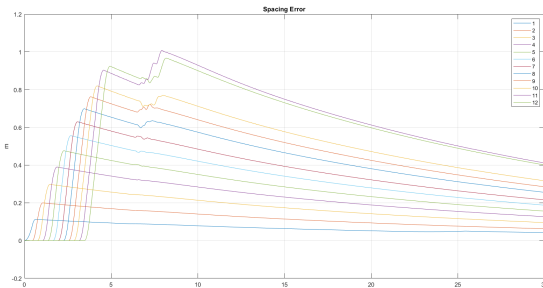


Fig. 5. Evolución del error de espaciamiento por vehículo (modelo cinemático).

2) *Costo en comunicaciones*: Las Figuras 9 y 10 muestran el patrón de transmisiones para cada seguidor en ambos modelos. En el modelo dinámico propuesto, las transmisiones son casi regulares en el tiempo: una vez que la perturbación alcanza a cada vehículo, éste comienza a transmitir de manera casi periódica a lo largo del horizonte. El agendamiento NOMA distribuye las oportunidades de transmisión de forma uniforme entre los seguidores, evitando grandes intervalos sin comunicación. Esta regularidad es coherente con los perfiles de error más suaves, que requieren ajustes graduales de control y, por tanto, una monitorización continua pero moderada del estado de los predecesores.

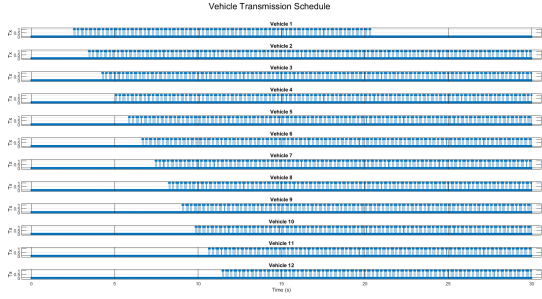


Fig. 9. Schedule de transmisión por vehículo para el modelo dinámico con *jerk* limitado.

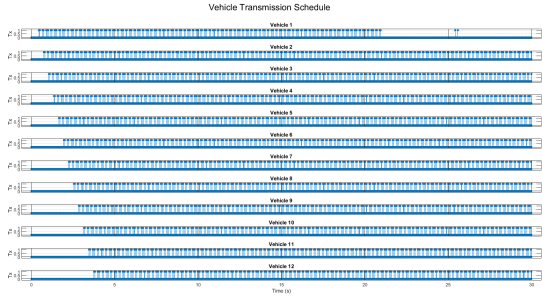


Fig. 10. Schedule de transmisión por vehículo para el modelo cinemático original.

En el modelo cinemático de referencia, en cambio, se observan densidades mucho mayores de transmisiones, especialmente en los vehículos más lejanos al líder. Esto se debe a que los errores de espaciamiento son más abruptos, condición que se acumula hacia la cola del pelotón y obliga a transmisiones más frecuentes para corregir desviaciones repentinas. El agendamiento NOMA, aunque eficiente, no logra distribuir las transmisiones de forma tan uniforme, resultando en intervalos irregulares y picos de actividad que reflejan la naturaleza más errática del error.

La Tabla I resume las métricas de comunicación agregadas. A pesar de mostrar mejor desempeño en términos de estabilidad y error, el modelo dinámico con *jerk* limitado utiliza menos recursos de comunicación: el número total de paquetes transmitidos se reduce aproximadamente en un 19% (de 3264 a 2664), y la energía de transmisión integrada disminuye alrededor de un 25% (de 9.02×10^{-6} J a 6.79×10^{-6} J). Esto indica que el modelo propuesto no sólo mejora la calidad de seguimiento, sino que lo hace con un costo de comunicaciones menor, lo que resulta especialmente relevante para escenarios V2V con recursos espectrales y energéticos limitados.

TABLE I
MÉTRICAS AGREGADAS DE COSTO EN COMUNICACIONES PARA AMBOS MODELOS.

| Modelo | Paquetes acumulados | Energía integrada [J] |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Cinemático (paper) | 3152 | 9.02×10^{-6} |
| Dinámico con <i>jerk</i> limitado | 2664 | 6.79×10^{-6} |

VII. CONCLUSIONES

Este trabajo replicó la arquitectura de control NOMA-V2V de [?] y demostró que los modelos cinemáticos utilizados en la literatura subestiman los requisitos de comunicación y la realidad física del control.

La propuesta de un modelo dinámico limitado por *jerk* evidencia que:

- 1) NOMA es una tecnología habilitadora robusta que permite absorber este exceso de carga de comunicación sin saturar el canal, validando su uso en VCPS de alta fidelidad.
- 2) Se redujo el costo de comunicación total en un 25 %, sugiriendo que modelos más realistas pueden optimizar el uso del canal al evitar transmisiones innecesarias principalmente debido a la sobreestimación del error y a cambios mucho mas suaves.
- 3) El modelo dinámico con *jerk* limitado mejora la estabilidad del pelotón, reduciendo el error de espaciamiento promedio y maximo

Futuras líneas de investigación incluyen la validación experimental en bancos de prueba vehiculares, la introducción de modelos de canal más complejos y la exploración de estrategias de aprendizaje de maquina para optimizar el co-diseño control-comunicación.