

Sistema Plataforma Multiagente Para el Levantamiento de Vehículos de n Ejes con Cargas Heterogéneas

Alvaro Javier Flórez Martínez
Escuela de Electrica y Electrónica
Universidad de los Andes
Bogotá
Email: aj.florez@uniandes.edu.co

Luis Carlos Díaz Buatista
Escuela de Electrica y Electrónica
Universidad de los Andes
Bogotá
Email: lc.diaz@uniandes.edu.co

Resumen—En este trabajo se abordó la problemática del riesgo de volcamiento al elevar vehículos de grandes dimensiones con distribuciones de peso no uniformes. Por sus características de robustez y versatilidad Consensus fue escogido como la metodología para abordar este problema. El enfoque de una red de subsistemas que convergen a un valor de referencia en un proceso de optimización con unas trayectorias interpretadas como un método del gradiente, es usado para analizar las trayectorias y para agregar las restricciones del sistema. Un modelo de actuadores hidráulicos es implementado y es conectado al sistema de consenso para analizar la interacción entre ellos ante cambios de las constantes de tiempo de cada sistema. Los mínimos criterios de convergencia respecto al intercambio de información entre agentes son probados, simulando el sistema para la red de agentes con dichas conexiones permitiendo analizar cualitativamente el comportamiento de las trayectorias.

I. INTRODUCCIÓN

Las ciudades más pobladas del mundo presentan grandes retos de movilidad, por lo que deben implementar sistemas integrados de transporte masivo; entre los que se cuentan los metros, trenes ligeros, tranvías o un sistemas de buses articulados con carriles exclusivos como es el caso de varias ciudades en Colombia. Los vehículos utilizados en estos sistemas de transporte suelen ser de gran envergadura, esto provoca que se dificulte su manipulación para labores de mantenimientos preventivo y correctivo, estas operaciones son indispensables en la operación de cualquier sistema de transporte público.

En el caso de Colombia, sistemas como TransMilenio SITP tienen vehículos articulados o bi-articulados. La tabla I presenta un resumen de las especificaciones de sus buses de mayor tamaño. Tradicionalmente, se han utilizado arreglos distribuidos de elevadores hidráulicos de carga para hacer el mantenimientos de estos buses, sin embargo, esta práctica supone un riesgo de volcamiento de los vehículos al momento de elevarlos, esto puede ocurrir debido a que uno o más de los elevadores que componen el arreglo presenten un desnivel.

Por lo tanto, una práctica muy aconsejable a la hora de elevar vehículos con estas especificaciones, es hacerlo de manera que en ningún momento haya una diferencia importante en altura entre los diferentes elevadores que componen el arreglo.

Especificación	Articulado	Bi-articulado
cuerpos	2	3
fuelles	1	2
longitud	18(m)	24.85(m)
ejes	3	4
capacidad	180	250

Tabla I: Especificaciones técnicas buses articulados.

Con el crecimiento de sistemas computacionales en dispositivos autónomos crece la posibilidad de mejorar su desempeño y de realizar tareas en cooperación. Consensus es una temática que se ha implementado en diferentes campos del control y tiene características importantes. El sistema desarrollado está conformado a su vez por subsistemas. Es descentralizado, es decir la información no está concentrada en un solo lugar y cada dispositivo no debe conocer toda la información de los demás. El sistema es adaptativo ante perturbaciones o fallos de los dispositivos. Por estas razones, se considera que aplicar el método consenso, hace el sistema más confiable en el momento de sus operación.

II. SISTEMA DE ELEVACIÓN

Este sistema consta de n pistones hidráulicos ubicados espacialmente de manera que cada uno sostenga un eje del vehículo que se desea elevar. En este análisis sólo nos vamos a concentrar en la altura de pistón respecto a un nivel de referencia que sería cero. En este caso específico se considerarán seis actuadores los cuales tienen una distribución de un arreglo 2x3.

II-A. Pistón hidráulico

Para simular el comportamiento de este actuador se consideró el modelo propuesto en [1]. La planta es definida por un sistema no lineal, esta incluye un modelo de fricción, de una servo válvula y la dinámica de un cilindro externo que representa la carga. El esquema de la Figura 1 describe físicamente el actuador considerado. Cada pistón cuenta con una cámara dividida por un émbolo, se bombea fluido desde u_2 , por simplicidad consideraremos este flujo constante. La

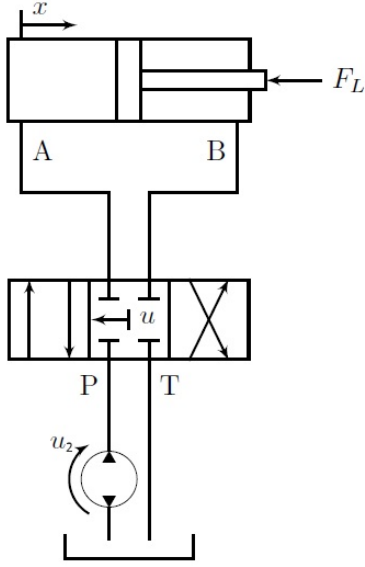


Figura 1: Esquema físico

electro válvula u controla el flujo para cada una de las cámaras A y B , la diferencia de presión entre estas y el peso de la carga definirá el movimiento y la posición del pistón.

En este trabajo se diseñó un control robusto para llevar el error de posición a cero asumiendo que el vector de estados es completamente medible. Las ecuaciones de estado que resultan son las mostradas en 1, donde x_1 y x_2 son la posición y velocidad del pistón respectivamente, x_3 es la presión de la carga, x_4 y x_5 son la dinámica y el control de la servo válvula.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(-k_s x_1 - b_d x_2 + \Lambda_a x_3 - F r - M) \\
 \dot{x}_3 &= -\alpha x_2 - \beta x_3 + (\gamma \sqrt{P_s} - \text{sgn}(x_4) x_3) x_4 \\
 \dot{x}_4 &= x_5 \\
 \dot{x}_5 &= -c_n x_4 - b_n x_5 + a_n u
 \end{aligned} \tag{1}$$

Los valores de los parámetros del modelo usados para simulación son presentados en la Tabla II. Con estos valores la respuesta del pistón es estable. Adicionalmente el sistema se configuró en lazo cerrado y se agregó un control proporcional e integral, con el fin de que el sistema tenga error cero al estabilizarse y coincida con el valor de referencia que será el correspondiente al consenso.

III. CONSENSUS

En muchos problemas que involucran múltiples agentes que requieren interactuar en una secuencia de tareas, típicamente las tareas y las interacciones pueden ser definidas por actividades en secuencias de tiempo que cada agente debe cumplir en determinado tiempo con recursos definidos, aunque estos problemas pueden ser solucionados con algoritmos de planeación, pueden ocurrir cambios durante la ejecución que

harán que la tarea no se complete exitosamente, por tanto es de interés un marco de trabajo que cuando ocurran perturbaciones pueda adaptativamente sugerir cambios en los agentes que permitan que lleguen a un acuerdo. [2].

Cuando múltiples vehículos concuerdan en el valor de una variable de interés, se dice que han llegado a un *consensus*, para lograr llegar a este estado, los vehículos deben compartir información en una red, además de tener algoritmos llamados algoritmos de consenso, los cuales negociarán como se llega a la variable deseada [3]

La interacción de agentes en una red con cierta topología es representada por un grafo $G = (V, E)$ con el grupo de nodos $V = \{1, 2, \dots, n\}$ y bordes $E \subseteq V \times V$. Los vecinos del agente i son definidos por $N_i = \{j \in V : (i, j) \in E\}$.

III-A. Information Consensus

Consideremos una red de agentes con dinámicas $\dot{x}_i = u_i$ interesados en alcanzar un consenso mediante comunicación local con sus vecinos en un grafo $G = (V, E)$. Alcanzar consenso significa que el sistema converge asintóticamente a $x_1 = x_2 = \dots = x_n$, es decir que el los valores de cada agente serán $x = \alpha \mathbf{1}$ donde $\alpha \in \mathbb{R}$ es la decisión colectiva del grupo de agentes. Sea $A = [a_{ij}]$ a matriz de adyacencia del grafo G . El conjunto de vecinos del agente i es N_i y está definido por $N_i = \{j \in V : a_{ij} \neq 0\}$ $V = \{1, 2, \dots, n\}$.

Note que $a_{ij} > 0$ (es vecino) cuando $(i, j) \in E$, de otro modo $a_{ij} = 0$. El agente i se comunica con el agente j si j es un vecino. Estableciendo $a_{ij} = 0$ define el hecho que el vehículo i no puede recibir información desde el vehículo j . El conjunto de todos los nodos y sus vecinos define el borde E del grafo.

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j(t) - x_i(t)) \tag{2}$$

El sistema lineal definido en 2 es un algoritmo distribuido de consenso, este garantiza convergencia a una decisión colectiva mediante interacción local entre agentes [3] [4] [5] [2]. Una consecuencia de 2 es que la información del estado $x_i(t)$ del vehículo i es llevado hacia la información del estado de sus vecinos. Asumiendo que el grafo es unidireccional, es decir $a_{ij} = a(ji)$ para todo i, j , esto conlleva a que la suma de los estados de todos los nodos es una cantidad invariante, o $\sum_i \dot{x}_i = 0$, aplicando esta condición dos veces en $t = 0$ y en $t = \infty$ se obtiene que:

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_i x_i(0) \tag{3}$$

Esto puede ser interpretado como que el valor de consenso al que llegarán los agentes será el promedio de los valores iniciales de cada uno.

III-B. Consensus Tracking Protocol

En algunas aplicaciones es deseable que el estado de consenso de información converja a un valor predefinido. Por tanto los agentes deben converger a un mismo valor, pero también al estado de su valor de referencia. Por tanto

se considera un grupo de n agentes más un líder virtual $n + 1$. El estado $x_{n+1}=x_r \in \mathbb{R}^n$ contiene la información de referencia para el consensus. El grafo $G_{n+1} = (V_{n+1}, E_{n+1})$ es usado para modelar la interacción entre $n + 1$ vehículos (con el líder virtual). Definamos $A_{n+1} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{(n+1) \times (n+1)}$ la matriz de adyacencia asociada a G_{n+1} , dónde $a_{ij} > 0$ si $(j, i) \in E_{n+1}$ y $a_{n+1} > 0$ si x_r está disponible para el vehículo i para $i = 1, 2, \dots, n$. Finalmente, $a_{(n+1)j} = 0$ para todo $j = 1, 2, \dots, n + 1$ y $a_{ii} = 0$ para todo $i = 1, 2, \dots, n$. El líder puede ser interpretado como un nodo que ignora todos los demás nodos, pero continua transmitiendo su información.

De [5](Theorem1) supone que A_{n+1} es constante. El problema de *Consensus Tracking* con una referencia constante es resuelto con la definición del líder virtual, si y sólo si el grafo G_{n+1} tiene un árbol de alcance directo (*directed spanning tree*)

Note que el vehículo $n + 1$ posee la información de la referencia y la condición que G_{n+1} tiene un árbol de alcance directo es equivalente a la condición que al menos, un camino une a todos los vehículos, incluyendo al líder virtual $n + 1$.

IV. RESTRICCIONES

Las restricciones para el sistema representan una condición importante debido a que si no se cumplen podría fallar todo el funcionamiento. Una manera de abordar este requerimiento es desde el punto de vista de optimización, visualizando el consensus cómo la minimización de la distancia entre agentes y en la cual se llega a la solución mediante el método del gradiente descendente ya que se tiene unas dinámicas de la forma $\dot{x} = -\nabla_x f(x)$. Vamos entonces a considerar los métodos de barrera para una optimización con restricciones, la región factible está definida por

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n : g_i(x) \leq 0, i = 1, \dots, n\}$$

En los métodos de barrera se asume que es dado un punto x^0 que está dentro de la región factible S , y nosotros imponemos un alto costo en los puntos dentro de la región factible que están cerca al borde, creando así una barrera para dejar la región factible [6].

Una función barrera es cualquier función continua $b(x)$ definida en el interior de la región factible S tal que $b(x) \rightarrow +\infty$ cuando $g_i(x) \rightarrow 0^-$. [7] Dos ejemplos comunes para funciones de barrera son

$$b(x) = -\sum_{i=1}^n \ln(-g_i(x)) \quad \text{y} \quad b(x) = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{g_i(x)} \quad (4)$$

Note que ahora el problema no tiene restricciones, y la desigualdad $g(x) < 0$ está definida en el dominio de la función objetivo.

Para nuestro caso en particular la restricción radica en que las plataformas de elevación podrán desalinearse máximo $1mm$, por tanto la función de barrera diseñada es

$$b(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{b_a}{1 - (x_i - x_j)^2}; \forall j \neq i \quad (5)$$

V. ENSAMBLE MODELO REAL

El consensus contiene las dinámicas de los agentes y es posible conocer la evolución de las trayectorias, pero estos valores son ideales. La implementación de dicho algoritmo en un sistema real deberá tener en cuenta las dinámicas propias de cada agente. En este escenario los valores resultado del consensus serán los valores de referencia para los agentes (actuadores) como se observa en la Figura 2. El sistema real debe ser estable y llegar a un valor de referencia dado. Por ejemplo para nuestro caso el actuador es un pistón hidráulico con un controlador proporcional integral que sigue un valor de referencia.

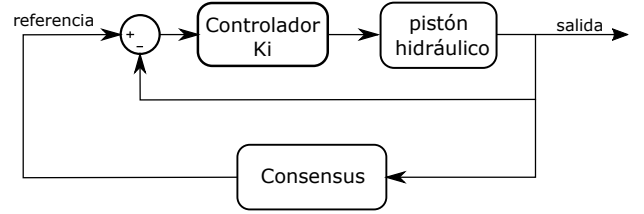


Figura 2: Esquema de conexión Consensus-Planta

Las dinámicas de cambio del consensus idealmente deben ser más lentas que las del sistema físico con el objetivo de que la planta pueda seguir la trayectoria trazada por el consensus. Para efectos prácticos de la implementación desde el punto de vista discreto el periodo del consensus deberá ser mayor que el de la planta. Para que exista una mejor interacción consensus-planta, el valor de entrada para cada iteración del consensus será el valor de posición de la planta (ver Figura 2), esto conlleva a que si los actuadores son lentos, el consensus 'espere' a la planta, pero si la planta es suficientemente rápida la planta no influirá en el comportamiento del consensus.

VI. SIMULACIONES

Para realizar las simulaciones se tomaron los datos correspondientes al modelo del pistón de [1], los cuales se muestran en la Tabla II.

Tabla II: Valores del Modelo

m	24kg	k_s	1610N/m
b_d	310N/(m/s)	P_s	1,03e7pa
Λ_a	3,26e - 4m ²	α	1,51e10N/m ³
β	11/s	γ	7,28e8g ^{0,5} /m ^{1,5} s ²
M	300 - 500N	a_n	2,4315e5
b_n	6,2529e2	c_n	2,5676e5

La posición inicial para cada agente es $[0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5]$, el periodo de consensus $T_c = 0,5[s]$, matriz de adyacencia es una matriz de unos con ceros en la diagonal (fully connected), los valores iniciales de las demás variables de estado para todos los actuadores es $[0, 6e6, 0, 0]$, los valores de carga para cada actuador $[300, 300, 310, 350, 590, 700]$, los valores de las constantes del controlador son $k_p = 1e - 2$ y $k_i = 1e - 6$, el periodo de solución para la planta $T_s = 0,1[s]$, el valor del numerador de

la función barrera $b_a = 1e - 3$ valore de referencia para el consensus 0,7 y finalmente el tiempo total de la solución es 40[s].

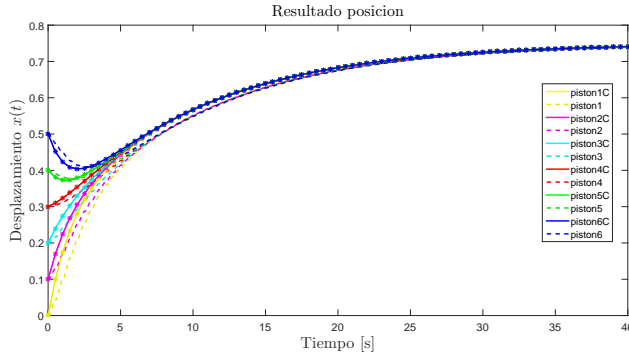


Figura 3: Consensus en tiempo

El resultado es como el esperado, se pueden diferenciar dos dinámicas en el resultado de la Figura 3, donde primero se trata de minimizar las diferencias entre agentes y a medida que se van acercando comienzan a converger en grupo al valor de referencia del consensus, observamos que las posiciones reales (líneas punteadas) siguen con los valores de referencia de manera suave por tanto los periodos para cada sistema son los adecuados.

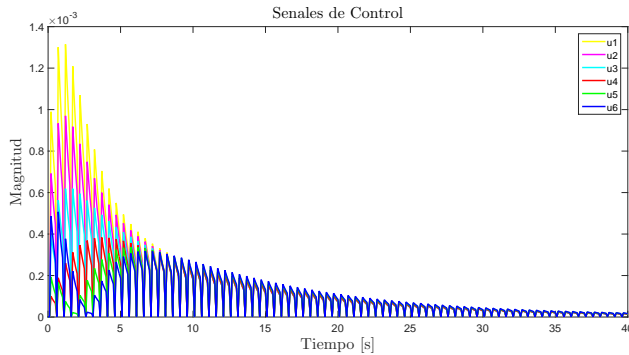


Figura 4: Señales de Control en tiempo

Las señales de control Figura 4 más altas inicialmente son las de los agentes más lejanos al punto de encuentro. Una vez los agentes confluyen a la misma posición, en su recorrido grupal al valor de referencia, las señales de control son las mismas y van disminuyendo a medida que convergen, el cual es el comportamiento esperado.

En la Figura 5 se evidencian algunas diferencias en las señales de control, esto corresponde a las diferentes caras que tiene cada actuador, vemos que las señales más altas corresponden a los actuadores que tienen más peso sobre ellos, por tanto las dinámicas propias del consensus hacen que se equilibren estas diferencias.

En la Figura 6 se muestra el resultado para el sistema cuando el grafo justo cumple la condición de ser un árbol de alcance directo, es decir los agentes no se conectan entre ellos, sólo se conectan con el líder virtual. El resultado confirma que que

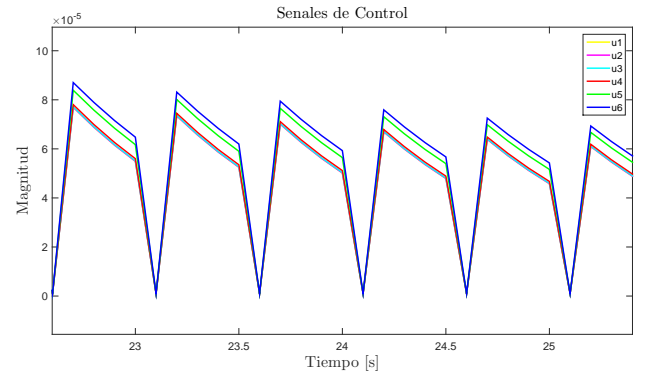


Figura 5: Zoom Señales de Control en tiempo

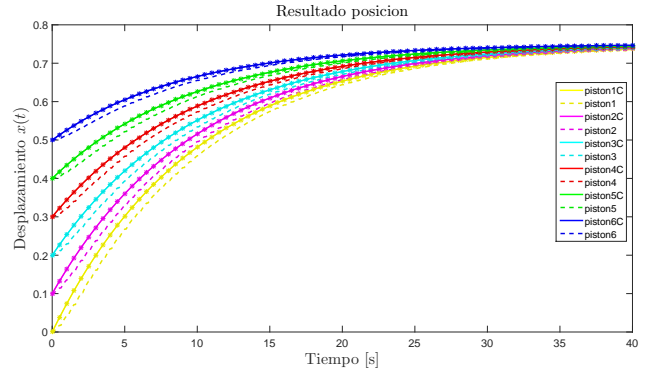


Figura 6: Consensus en tiempo para un grafo mínimamente conectado

se llega a un consensus en el valor de referencia, pero sus dinámicas cambian, solo dependen de la referencia.

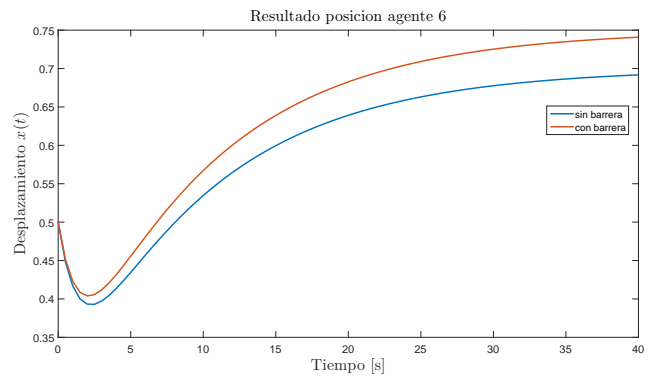


Figura 7: Trayectoria del agente 6 con y sin barrera

En la Figura 7 se muestra e comportamiento de uno de los agentes con y sin la presencia de la restricción. Se evidencia que cuando la restricción está activa las dinámicas son más rápidas, y este efecto aumentará a medida que el sistema se acerque a los valores de la restricción.

VII. CONCLUSION

El consensus cómo modelamiento de las dinámicas de interacción entre agentes hace que cada agente llegue a un valor común para las variables de interés. Es valioso notar que debido a que su dinámica está definida con base en la información de los demás, esto lo hace adaptativo ante perturbaciones o cambios en la referencia. No es necesario que cada agente conozca y comparta información con todos los agentes, basta con cumplir que el grafo sea un árbol de alcance directo (*directed spanning tree*) para que el sistema converja. Es posible acoplar el modelo real del sistema y que en conjunto consensus-planta interacciones, tengan la trayectoria deseada y converjan a el valor de referencia definido. El enfoque desde el punto de vista de optimización es muy valioso, ya que permite interpretar las trayectorias de los agentes como el proceso de convergencia en un método del gradiente descendente. Adicionalmente permite incluir las restricciones como las ya desarrolladas en optimización, una de las cuales se usó en este trabajo (método de la barrera). Estas perspectivas hacen interpretables cualitativamente las dinámicas del sistema y permite diseñar las tendencias de las trayectorias.

REFERENCIAS

- [1] M. A. Avila, A. G. Loukianov, and E. N. Sanchez, "Electro-hydraulic actuator trajectory tracking," in *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, vol. 3, June 2004, pp. 2603–2608 vol.3.
- [2] K. L. Moore and D. Lucarelli, "Decentralized adaptive scheduling using consensus variables," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 17, no. 10-11, pp. 921–940, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/rnc.1143>
- [3] W. Ren and R. W. Beard, *Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control: Theory and Applications*, 1st ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2007.
- [4] R. Olfati-saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," in *Proceedings of the IEEE*, 2007, p. 2007.
- [5] B. Ordoñez, U. F. Moreno, J. Cerqueira, and L. Almeida, *Generation of Trajectories Using Predictive Control for Tracking Consensus with Sensing and Connectivity Constraint*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 19–37.
- [6] M. A. Epelman, *Barrier Methods for Constrained Optimization*.
- [7] P. Zörnig, *Nonlinear Programming : An Introduction*. De Gruyter, 2014.