

Protocolo de Consenso para Sistemas que incorporan una Heurística de Anclaje y Ajuste. Aplicación a la Prueba Piloto del Sistema de Bicicletas Públicas de Bogotá: BiciBog

Fernando Guerra, Jack Hurtado

Universidad Central Bogotá, Colombia

fguerraa@ucentral.edu.co, jhurtadoc1@ucentral.edu.co

Resumen—Considere una red de agentes/sistemas dinámicos. Cada uno de los agentes consta de entradas, salidas, y un conjunto de estados evolucionado de acuerdo a una ley dinámica determinista. Se estudia aquí una aplicación a la prueba piloto del sistema de bicicletas públicas de Bogotá BiciBog en la que dichos agentes considerados estaciones de bicicletas, interactúan para alcanzar un consenso en sus niveles de inventario a pesar que no exista dirección central. Se implementan modelos con distintos protocolos, encontrándose que las formas de interacción permiten gestionar los niveles de inventario de cada una de las estaciones de manera efectiva.

Index Terms—Protocolos de Consenso, redes de agentes, Emergencia, Sistemas de Bicicletas públicas.

I. INTRODUCCIÓN

En este documento se describe e implementa un protocolo de consenso [1], [2], [3], [4] a un conjunto de agentes/sistemas dinámicos que deciden mediante heurísticas de anclaje y ajuste, según se describe en [5]. Cada agente se encarga de gestionar el nivel de inventario de bicicletas de cada una de las cinco estaciones de la prueba piloto del sistema de Bicicletas públicas de Bogotá: BiciBog. La idea es definir un protocolo para todos los agentes (estaciones), cuya ejecución se da en el ámbito local (actúa sobre las estaciones vecinas) y sin embargo, su efecto es global (se alcanza el nivel de inventario deseado en la totalidad de las estaciones que componen el sistema).

El contenido del documento es como sigue: En la primera parte se explica la problemática alrededor de la prueba piloto de bicicletas públicas en la ciudad de Bogotá, enseguida se construye el modelo

de agente (estación) a los ojos del problema de aplicación, involucrando una política basada en heurísticas de anclaje y ajuste. La segunda parte trata de la implementación del protocolo de consenso y su interpretación en el contexto del sistema BiciBog, para finalmente, ejecutar el modelo y proceder a validar los resultados del mismo.

II. EL SISTEMA BICIBOG

El Sistema de Bicicletas Públicas instalado en la ciudad de Bogotá en el mes de noviembre del 2011 (BiciBog), consta de una serie de estaciones en dos puntos de la ciudad aislados entre sí, cada punto con características socio-económicas distintas, en los cuales los usuarios después de realizar un respectivo registro y carnetización, pueden obtener una bicicleta sin ninguna contraprestación, más que el uso por las zonas indicadas y debidamente delimitadas por el personal de apoyo, el respeto por las normas básicas de tránsito y el respectivo uso de un casco de protección.

Las estaciones son abastecidas con un determinado número de bicicletas en la apertura del sistema (generalmente 20 en las consideradas como principales, y 10 en el resto). Este procedimiento es realizado por parte del personal encargado de cada punto y sin prever la posible rotación de bicicletas sobre las estaciones según la dirección del flujo de usuarios en el horario de apertura. Enseguida, el responsable del punto debe realizar monitoreo constante de la demanda y las bicicletas disponibles, para que mediante la comunicación en tiempo real con los demás encargados de estación y coordinador

de zona, se determinen las estaciones de origen y la rotación del inventario de bicicletas, intentando evitar el desabastecimiento en las estaciones.

Al trabajar en la operación de BiciBog, se observa que no existe política alguna o método específico para realizar el control del sistema de inventario de bicicletas, entendido como: la determinación del número de bicicletas por estación en un instante o intervalo de tiempo cualquiera y la frecuencia en que se debe realizar la rotación o realimentación de estas sobre las estaciones, permitiendo suplir la mayor cantidad de usuarios con intención de realizar un desplazamiento bajo las condiciones de uso establecidas y previa aceptación de estas. Es decir; no existen políticas de gestión formales que permitan establecer cuando, cuantas y como se deben redistribuir las bicicletas en las estaciones, para suplir la demanda independiente que se presenta en cada una de ellas.

III. EL MODELO DE AGENTE

A continuación se definen los agentes /estaciones con sus reglas de decisión El agente i , $i = 1, 2, \dots, 5$ consta de:

- Función sensor (entrada) u_i
- Función efector o actuador (salida) $a_i x_i$
- Regla de decisión basada en heurística de Anclaje y Ajuste y ley de evolución:

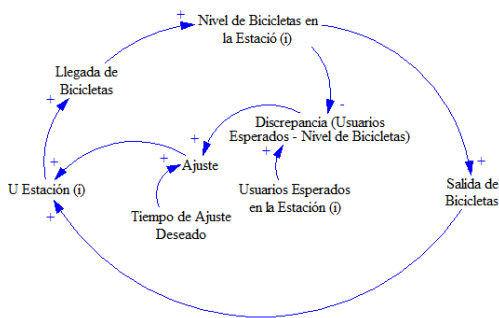


Figura 1. Diagrama Causal de la i -ésima Estación

Para el agente i , se incorpora una regla de decisión basada en la heurística de Anclaje y ajuste pensando en que cada uno de las estaciones busca ajustar su estado x_i hasta alcanzar una meta o estado deseado (cantidad de usuarios esperados) que se ha fijado en un tiempo determinado. La forma de

alcanzar su meta es entonces a través del ajuste $\frac{Ed_i - E_i}{Ta_i}$ (cociente entre la discrepancia y el tiempo de ajuste).

Para tomar una decisión, el agente debe anticipar la tasa de salida. Tal ejercicio de anticipación requiere el uso de instrumentos de medida que nunca permiten tener valores instantáneos de la salida. El agente debe entonces hacer una predicción basado en un histórico de las mismas. Ese valor se modelará como valor esperado de la tasa de salida.

El agente con la heurística de Anclaje y ajuste tiene el diagrama de Forrester:

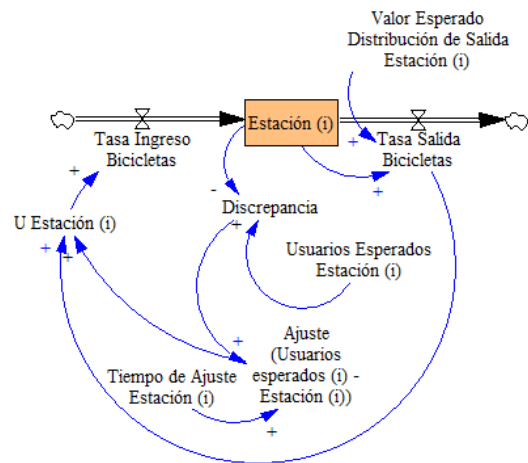


Figura 2. Diagrama de Forrester de la i -ésima Estación

Ley de evolución Determinista

En la (figura #2) se observa el Modelo Determinista General para cada una de las Estaciones del sistema y a continuación se relacionan las Ecuaciones asociadas al Modelo.

$$\frac{dE_i}{dt} = U_i - T_{s_{is}}$$

$$U_i = \frac{Ed_i - E_i}{Ta_i} + T_{is}; \quad T_{s_{is}} = \frac{E_i}{Vets_i}$$

$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{Ed_i - E_i}{Ta_i} + T_{is} - T_{is}$$

$$\frac{dE_i}{dt} = -\frac{E_i}{Ta_i} + \frac{Ed_i}{Ta_i}$$

Por ende los valores propios relacionados a cada estación del modelo están dados por:

$$\lambda_i = -\frac{1}{Ta_i}$$

Donde Ts_{is} representa la Tasa de Salida de la Estación i y su magnitud la determina el valor esperado de la Distribución de Probabilidad asociada a la llegada de usuarios de cada Estación.

- E_i : Nivel de Bicicletas en la Estación i .
- Ed_i : Nivel de Bicicletas deseado en la Estación i .
- Ta_i : Tiempo de Ajuste para la Estación i .
- U_i : Entrada de la estación E_i que involucra la heurística de anclaje y ajuste.
- $Vets_i$: Valor Esperado de la Distribución de Salida de la Estación i .

Note que que la ley de evolución es determinista al implementar la heurística de anclaje y ajuste, pues se reemplaza la distribución empírica de la salida por el valor esperado de la misma.

IV. LOS PROTOCOLOS DE CONSENSO

Conociendo las cinco estaciones con sus reglas de decisión, se procede a implementar tres formas de interacción que explicitan las diferentes topologías de red. Las redes resultantes se representarán mediante grafos dirigidos, donde los nodos son cada una de las cinco estaciones y los enlaces indican la existencia de comunicación entre cada par de estaciones (el protocolo).

IV-A. Protocolo de consenso 1

La primera regla de interacción con la que se trabaja aquí, proviene de [1], [2] y consiste en que: Para n agentes, el agente i interactúa con el agente $i + 1$ conectando su salida i a la entrada del agente $i + 1$. El último agente (el agente n) se conecta con el agente 1 formándose un bucle de agentes.

De acuerdo al protocolo 1 definido, se decide trabajar con redes conformadas por las 5 estaciones todas del mismo tipo. Esta red se caracteriza por representarse mediante grafos dirigidos y conectar cada agente con su vecino inmediato en el sentido de las manecillas del reloj (sentido horario). La última estación se conecta con la primera de tal forma que siempre se obtenga un bucle de realimentación. La figura 3 muestra la topología de red para las estaciones que se obtiene con el protocolo establecido. La unidad de tiempo en todos los modelos es minutos.

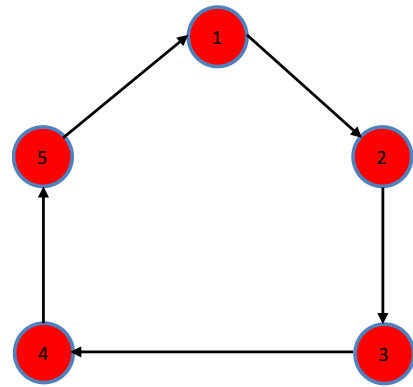


Figura 3. Grafo para el Protocolo 1

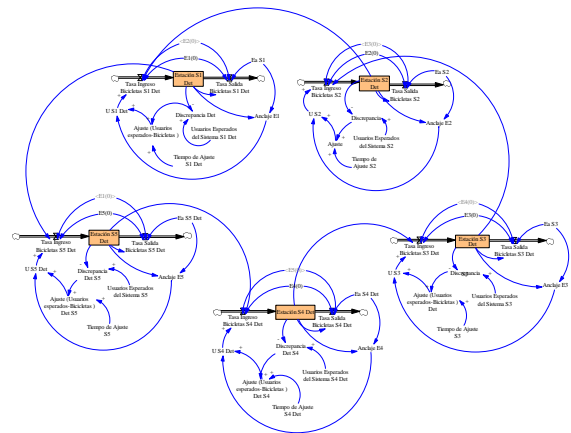


Figura 4. Modelo en Vensimple Grafo # 1

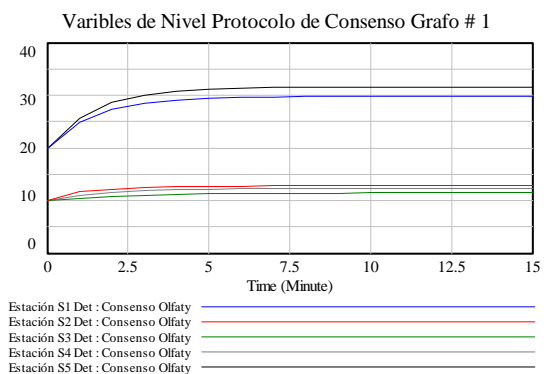


Figura 5. Comportamiento del Protocolo de Consenso Bajo la primera regla de Interacción.

las figuras 4 y 5 muestran el diagrama de Forrester implementado para el protocolo 1 y la

convergencia a valores deseados por parte de los inventarios de las cinco estaciones.

IV-B. Protocolo de Consenso 2

Proviene de [3] y consiste en que: Para n agentes, el agente i interactúa con el agente $i + 1$ y el $i - 1$ conectando su salida i a la entrada del agente $i + 1$, y al agente $i - 1$. El último agente (el agente n) se conecta con el agente 1 y el $i - 1$ formándose un bucle de agentes.

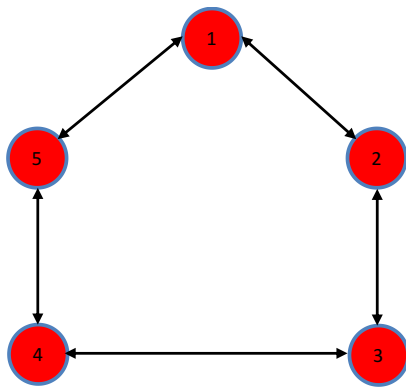


Figura 6. Grafo para el Protocolo 2

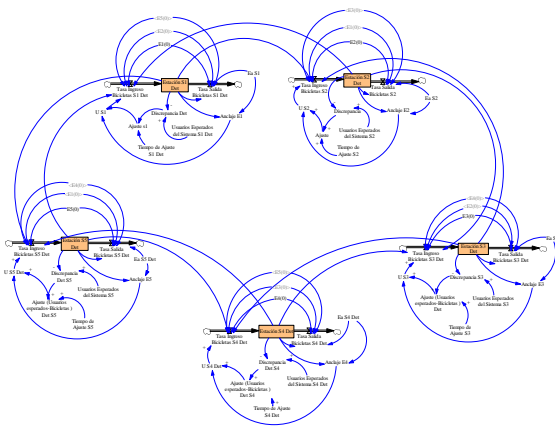


Figura 7. Modelo en Vensim Grafo # 2

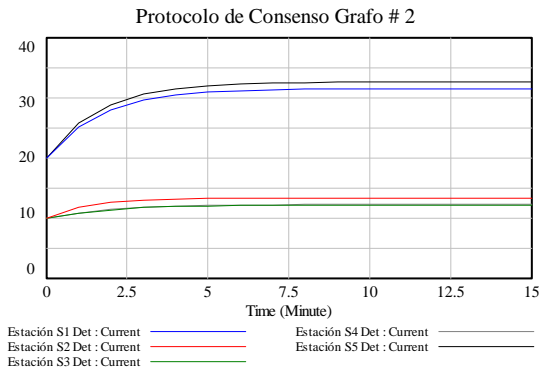


Figura 8. Comportamiento del Protocolo de Consenso Bajo la segunda regla de Interacción.

las figuras arriba muestran el grafo del protocolo 2, el diagrama de Forrester implementado y la gráfica de convergencia a valores deseados por parte de los inventarios de las cinco estaciones.

IV-C. Protocolo de consenso 3

La tercera regla de interacción consiste en que: Para los n agentes, el agente i interactúa directamente con los $n - 1$ agentes restantes de la red conectando su salida con cada una de las $n - 1$ entradas.

En las figuras abajo se muestra: el grafo del protocolo 3, el diagrama de Forrester implementado y la gráfica de convergencia a valores deseados por parte de los inventarios de las cinco estaciones.

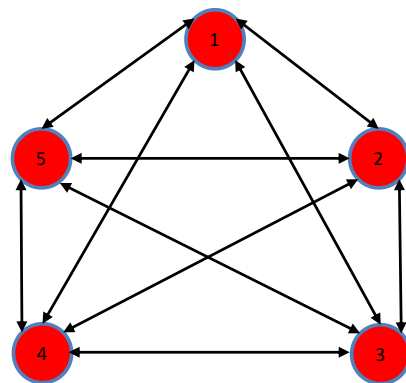


Figura 9. Grafo para el Protocolo 3

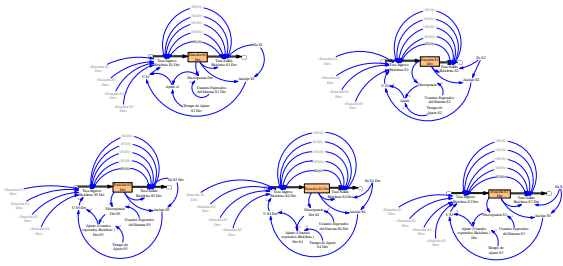


Figura 10. Modelo en Vensimple Grafo # 3

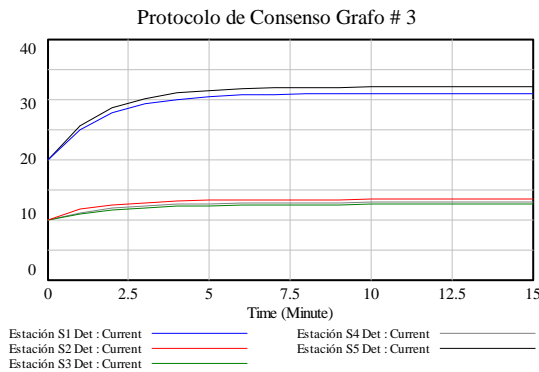


Figura 11. Comportamiento del Protocolo de Consenso Bajo la tercera regla de Interacción.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DEL MODELO CONSTRUIDO

El cuadro 1 contiene los valores propios de cada uno de los sistemas de ecuaciones diferenciales asociados a los protocolos estudiados.

Cuadro I
VALORES PROPIOS POR ESTACIÓN PARA LOS PROTOCOLO DE CONSENSO.

	P1	P2	P3
E1	-13,333402	-14,653214	-14,653351
E2	-11,526316	-11,206571	-11,206708
E3	-5,5556239	-8,9096944	-9,110862
E4	-6,8823529	-6,9572444	-8,7078752
E5	-7,25	-5,8211063	-5,8695811

Se encuentra que las matrices asociadas a cada uno de los tres protocolos, de acuerdo a los valores numéricos tomados a partir del sistema BiciBog, tienen valores propios negativos. Así, los sistemas se comportan como sumideros y por ende aseguran convergencia a puntos de equilibrio. Además, el tercer protocolo es el más veloz en tanto cada uno

de los valores propios en magnitud superan los de los demás protocolos implementados. Sin embargo, la diferencia entre los protocolos 2 y 3 no es grande, lo cual sugiere que el protocolo 2 puede rendir muy bien a un costo de conexión menor que el del protocolo 3, al pensar en su implementación.

A continuación se muestran los cuadros de de resumen de los resultados obtenidos tras la implementación de cada uno de los tres protocolos:

Cuadro II
RESULTADOS PROTOCOLO # 1

GRAFO # 1				
Estación	Valor Inicial	Valor Deseado	Tiempo de Ajuste	Tiempo de Convergencia
E1	20	30	1,5	20
E2	10	15	1,6	20
E3	10	10	1,7	20
E4	10	12	1,8	20
E5	20	35	1,9	20

Cuadro III
RESULTADOS PROTOCOLO # 2

GRAFO # 2				
Estación	Valor Inicial	Valor Deseado	Tiempo de Ajuste	Tiempo de Convergencia
E1	20	30	1,5	23
E2	10	15	1,6	23
E3	10	10	1,7	23
E4	10	12	1,8	23
E5	20	35	1,9	23

Cuadro IV
RESULTADOS PROTOCOLO # 3

GRAFO # 3				
Estación	Valor Inicial	Valor Deseado	Tiempo de Ajuste	Tiempo de Convergencia
E1	20	30	1,5	22
E2	10	15	1,6	22
E3	10	10	1,7	22
E4	10	12	1,8	22
E5	20	35	1,9	22

Destacandose:

- Sin importar el protocolo la velocidad de convergencia a valores deseados está entre 20 y 23 minutos, una velocidad muy buena.
- Para la estación número 1 el protocolo 3 produce la convergencia al valor deseado en un tiempo de 22 min.
- Para la estación número 2 el protocolo 3 produce la convergencia al valor deseado en un tiempo de 22 min.

- Para estación 3 el protocolo 1 produce la convergencia al valor deseado en un tiempo de 20 min.
- Para la estación 4 el protocolo 2 produce la convergencia al valor deseado en un tiempo de 23 min.
- Para la estación 5 el protocolo 2 produce la convergencia al valor deseado en un tiempo de 23 min.

El lector debe notar que el trabajo realizado es una aplicación de los procesos generales de toma de decisiones mediante heurísticas de anclaje y ajuste, comprendiendo que en un contexto de información limitada y tiempo limitado [6] en el que todos los agentes usan dicha heurística, un protocolo “económico” como el 2 (en cuanto al número de conexiones requeridas), permite distribuir la toma de decisiones sin dirección central de forma satisfactoria.

VI. COMENTARIOS FINALES

En [7] se aplicó el mismo protocolo a agentes distintos, en este trabajo se abordaron variaciones del protocolo desarrollado en ese documento a un agente el tipo AMPC con ajuste en los pesos a_{ij} al estilo de [4], pero tomando las diferencias en las condiciones iniciales para que el sistema resultante fuese lineal. Esto permitió que las trayectorias de cada uno de los agentes convergieran a valores deseados, obteniéndose un protocolo de consenso y no de cooperación como en [1] y [3].

La aplicación al sistema BiciBog muestra la posibilidad de implementación de protocolos de consenso para problemas de gestión de inventarios en redes, evidenciando que pueden encontrarse estructuras de red que no requieren la comunicación de directa de todos los agentes involucrados, derivando en la disminución de costos de conexión.

Por otro lado, el protocolo con sus variaciones trabajado aquí, produce redes que forman bucles de realimentación positiva, sin embargo el comportamiento resultante es convergente. Hecho que no deja de ser importante, pues en Dinámica de Sistemas se asocian bucles de realimentación positiva con situaciones divergentes. Los experimentos realizados, no contradicen los postulados en cuanto a realimentación se refiere, sino evidencian que cuando los elementos involucrados en los bucles son sistemas dinámicos (agentes), los comportamientos

encontrados requieren más que la realización de experimentos mentales con diagramas causales.

Finalmente, lo desarrollado en éste documento es la continuación del estudio para considerar las redes que involucran los tipos de agentes descritos en [7]. Sigue pendiente indagar las posibilidades de los protocolos cuando se aplican a redes heterogéneas donde se ponen en relación agentes de distinto tipo.

REFERENCIAS

- [1] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray. "Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 215-233, Jan. 2007.
- [2] R. Olfati-Saber. "Flocking for Multi-Agent Dynamic Systems: Algorithms and Theory," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 51(3), pp. 401-420, Mar. 2006.
- [3] R. Olfati-Saber and R. M. Murray. "Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time-Delays," *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 49(9), pp. 1520-1533, Sep. 2004.
- [4] Cucker F, Smale S, Emergent Behavior in Flocks, *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL VOL. 52, NO. 5, MAY 2007*.
- [5] Sterman J, *Bussiness Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, Mac-Graw Hill, 2000.
- [6] Simon H, *Rationality in Psychology and Economics The Journal of Business*, Vol. 59, No. 4, Part 2: The Behavioral Foundations of Economic Theory. (Oct., 1986), pp. S209-S224.
- [7] Guerra Fernando, *Consenso en Redes*. Ponencia en el IX Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas y II Congreso Brasileño de Dinámica de Sistemas, recuperado 02 de noviembre de 2012 de <https://docs.google.com/file/d/0BF3Xg6GPgGiRjZIMzFNLWpLaVU/edit?pli=1>



www.dinamica-de-sistemas.com

Libros

Cursos Online



[Ejercicios](#)



[Curso Básico Intensivo en Dinámica de Sistemas](#)



[Avanzado](#)



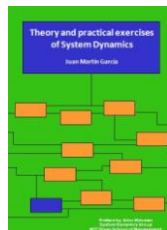
[Curso Superior en creación de modelos de simulación](#)



[Conceptos](#)



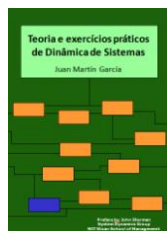
[Modelos de simulación en ecología y medioambiente](#)



[English](#)



[Planificación de empresas con modelos de simulación](#)



[Português](#)



[System Thinking aplicado al Project Management](#)