



AGENCIA NACIONAL  
DE INVESTIGACIÓN  
E INNOVACIÓN

# Informe final publicable de proyecto Control dinámico de redes distribuidas

Código de proyecto ANII: FCE\_1\_2019\_1\_156666

28/04/2022

**PAGANINI HERRERA, Fernando** (Responsable Técnico - Científico)

**MARVID, Diego** (Investigador)

**ESPÍNDOLA GONZÁLEZ, Emiliano** (Investigador)

**FERRAGUT, Andres** (Investigador)

---

UNIVERSIDAD ORT. FACULTAD DE INGENIERÍA (Institución Proponente)

## Resumen del proyecto

Realizamos contribuciones teóricas y aplicadas a problemas de control dinámico en redes complejas, a través de acciones distribuidas de sus componentes. Una herramienta central en nuestro estudio es la optimización convexa, en particular descomposiciones provenientes de la dualidad de Lagrange. A nivel teórico, obtuvimos nuevos resultados en cuanto a la dinámica de gradiente primal-dual para hallar puntos de silla; el método incorpora un término de regularización proximal, y se prueba convergencia en condiciones muy generales.

En la aplicación a redes eléctricas, consideramos el problema dinámico de regulación de frecuencia, que involucra la sincronización de generadores electromecánicos. Demostramos como técnicas de truncado balanceado producen modelos de orden reducido y gran fidelidad para el estudio de estos sistemas.

En la aplicación a computación en la nube, analizamos el problema de escalado automático de la capacidad activa de servidores, con modelos estocásticos. También, mediante optimización convexa el control conjunto de tres factores: el escalado de capacidad activa, el balanceo de carga entre múltiples clusters, y el agendado de tareas en cada uno de los mismos.

Por último, realizamos aportes iniciales al problema de optimización de una infraestructura espacialmente distribuida para atender una demanda, motivada por aplicaciones a sistemas de recarga de vehículos eléctricos; en esta materia se formaron dos estudiantes.

**Ingeniería y Tecnología / Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica e Ingeniería de la Información / Ingeniería Eléctrica y Electrónica / Control**

**Palabras clave: control / optimización / redes /**

## Introducción

Antecedentes:

Un desafío de larga data en la matemática aplicada es el de predecir el comportamiento global de una red compleja de componentes, cada uno de los cuales opera en base a información local. Problemas de este tipo aparecen en las redes de ingeniería (transporte, eléctrica, telecomunicaciones, etc.) y también en la economía. Aunque se conozca en forma precisa la ley que rige el comportamiento de cada agente, y el grafo de interconexión, resulta en general difícil resolver el comportamiento del conjunto. Por ejemplo, para una red donde los componentes son sistemas dinámicos, demostrar la existencia de equilibrios estables no es casi nunca sencillo. Se recurre mucho a la simulación, que tiene alcance limitado en sistemas de gran escala.

Desde la perspectiva de control, la dinámica de los agentes está a su vez elección del diseñador; la búsqueda de controladores óptimos o robustos entre todas las dinámicas posibles ha sido el objetivo más ambicioso de la teoría de control, pero su solución es en general incompatible con las restricciones de información descentralizada de un sistema en red. Los avances han venido para familias particulares de problemas: por ejemplo, para sistemas distribuidos de simetría espacial [BamPD02].

Un objetivo más asequible es limitar la elección de controladores a aquellos para los que uno pueda dar un certificado de comportamiento global. Un caso de éxito de este enfoque concierne al control de redes de telecomunicaciones, apoyado en técnicas de optimización convexa. Se plantea como objetivo de diseño la minimización de un costo convexo o la maximización de una utilidad cóncava, que cada agente persigue en forma individual; la fuerte estructura de la convexidad permite en ciertos casos demostrar convergencia global de la dinámica sobre toda la red. Por este método se han propuesto soluciones a problemas de ruteo [BertsGal92], control de congestión en Internet [KMT98, LowPD02], y también la coordinación entre distintas capas [ChiangLDC07, LinShSri06, PagM09]. Clave para estos avances es el uso extensivo de la dualidad de Lagrange, que da lugar a descomposiciones y proporciona algoritmos descentralizados, a través del descenso

por gradiente en variables primales, duales, o ambas.

En [FeiP10] estudiamos la dinámica de gradiente primal-dual para un problema convexo-cóncavo, retomando métodos clásicos de [AHU58], y la aplicamos a la optimización multicapa en redes inalámbricas. Llamativamente, este trabajo que para nosotros era el punto final de una línea, generó mucho interés y desarrollos posteriores. En sus aspectos teóricos [CheMC16] han refinado nuestras pruebas de convergencia para el caso de dinámica conmutada (discontinua). También se han obtenido resultados más fuertes de convergencia exponencial [QuL18], y otros para hipótesis más débiles de convexidad no estricta [CheMLC18]. Y aparecieron nuevas aplicaciones de este método a sistemas multi-agente [DroE13], teoría de juegos [GhaC13], mercados eléctricos [ZhangLP15], y aprendizaje automático [PatR17], entre otras, lo cual nos motiva a una nueva aproximación al tema.

Otro avance relevante de los últimos años procede de la comunidad de optimización; en ella se han desarrollado con fuerza los llamados algoritmos de punto proximal [BoyPCPE11, ParB13]. Si bien estos métodos tienen raíces más antiguas [CheT94], están recibiendo atención renovada por las siguientes razones: (i) proveen una forma sistemática de manejar funciones de costo no diferenciables, que aparecen en términos de regularización agregados para obtener "sparsity"; (ii) evitan oscilaciones en problemas de convexidad no estricta, y (iii) facilitan la descomposición en problemas más pequeños. Como es habitual en la literatura de optimización, dichos algoritmos se formulan como iteraciones en el tiempo discreto: sin embargo, existen fuertes conexiones con la dinámica de gradiente continuo, ver por ejemplo [DhiKJ18]. Consideramos que este espacio está todavía abierto para realizar contribuciones teóricas relevantes, que conecten los mundos del control y la optimización.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, un área de mucho interés para estos métodos son las redes eléctricas de potencia. En los trabajos de Mallada y colaboradores (ver [MallZL17]) se diseña una estrategia para que cargas inteligentes colaboren en la regulación de frecuencia de la red, basada en interpretar las ecuaciones propias de la sincronización de máquinas como una dinámica de gradiente primal-dual apropiada. Ideas similares se manejan en [ZhangLP15]. Más generalmente, en años recientes ha aparecido un nuevo interés en aplicar métricas tomadas del control robusto al problema de sincronización de la red [TegBG15]; a ese problema hemos contribuímos en años anteriores colaborando con Mallada [PagM17, PagM20]. En particular propusimos un método que compatibiliza este enfoque con otros más tradicionales en ingeniería de potencia, y del cual se derivan conclusiones de importancia práctica, como por ejemplo sobre el rol de la inercia en tales sistemas.

Mencionamos una segunda área de aplicación: la asignación de recursos en sistemas de computación en la nube. Ésta es la nueva frontera de las telecomunicaciones, en la cual se distribuyen no sólo los datos sino el procesamiento de los mismos, en granjas de servidores que deben coordinar sus operaciones entre sí. Algunos problemas importantes son el escalado de capacidad, ("speed scaling" o "right sizing") [LinWAT11], es decir adecuar en tiempo real la capacidad de los servidores a la carga; el balanceo de carga entre los servidores activos [Lu et al 11], y el agendado de servidores teniendo en cuenta la localización de los datos [WangYTZ16]; estas referencias enfocan el problema desde la perspectiva de la teoría de colas. En trabajos anteriores del grupo [GolFP17, GolFPJ17, GolFP18], investigamos este tema con herramientas de colas y de teoría de control, y conexiones entre ambos enfoques basados en modelos de fluido y difusión, encarados en la tesis de maestría de Goldszajn, de publicación pendiente al comenzar este proyecto.

Cuando se considera simultáneamente el escalado de capacidad con el balanceo de carga y el agendado, el problema tiene fuertes similitudes con la optimización multicapa en Internet, idea que comenzamos a explorar en los artículos de congreso [GolPF19, PagGF19]. Efectivamente se abren oportunidades en la intersección de estas dos áreas, y en particular para la dinámica primal-dual, que motivan su investigación en el presente proyecto.

Abordaje y Descripción del estudio:

Para explicar el abordaje teórico, brindamos brevemente algunos detalles sobre el método de gradiente primal-dual. Un método para minimizar una función  $F(x)$ , siendo  $x$  vector de  $\mathbb{R}^n$ , es plantear la dinámica  $dx/dt = -\text{grad } F$ , que mueve  $x$  en el sentido opuesto al gradiente: si la función es convexa este método garantiza la convergencia asintótica a un mínimo global. En forma análoga, una función cóncava se maximiza moviéndose a favor del gradiente. Supongamos que ahora se busca encontrar un punto de silla (mínimo en  $x$ , máximo en  $y$ ) de una función  $L(x,y)$  de dos variables vectoriales  $x$  en  $\mathbb{R}^n$ , y en  $\mathbb{R}^m$ . La dinámica

$$dx/dt = - \text{grad}_x(L),$$

$$dy/dt = +\text{grad}_y(L),$$

que mueve cada variable respectivamente en contra o a favor de su respectivo gradiente no es inmediata de estudiar. Sin embargo, es conocido desde [AHU58] que si  $L$  es convexa en  $x$ , cóncava en  $y$ , la distancia Euclidiana al punto de silla no crece en las trayectorias; bajo algunas hipótesis (por ej., convexidad estricta en  $x$ ) la estabilidad es asintótica, y hay convergencia al punto de silla.

El caso de mayor interés en la búsqueda de puntos de silla es cuando  $L(x,y)$  es el Lagrangiano de un problema de optimización, con variables primales  $x$ , duales  $y$ . En [FeiP10] estudiamos dicha dinámica de \*gradiente primal-dual\*, extendiendo los resultados clásicos de [AHU58]. El principal desafío aparece cuando las variables tienen restricciones de signo; esto ocurre para las duales correspondientes a restricciones de desigualdad. En ese caso a los gradientes anteriores se los debe \*proyectar\* sobre las direcciones admisibles, y la ecuación diferencial tiene campo discontinuo; extender la teoría de la estabilidad a estas situaciones ofrece dificultades considerables, cuya resolución involucra aspectos muy técnicos [CheMC16, CheMLC18].

En el presente proyecto nos propusimos investigar una técnica diferente para evitar estas discontinuidades, basada en los algoritmos \*proximales\* de optimización [ParB13], de gran desarrollo reciente. Una instancia de este método es un problema de minimización de una función  $F(x)$ , no necesariamente "suave" o estrictamente convexa, lo cual dificulta el desempeño del método de gradiente. El método proximal agrega una penalidad  $k \|x-z\|^2$  al costo de optimización, donde  $z$  es una variable auxiliar libre; claramente esto da un problema equivalente. La minimización del costo aumentado en  $x$  tiene mejores propiedades gracias a la penalización cuadrática, y regulariza el problema; luego se procede a minimizar en  $z$ . Nos interesa aplicar esta técnica en el contexto de una dinámica primal-dual, donde adicionalmente a la minimización en  $x$  se debe maximizar en la variable dual  $y$ .

Pasando a las aplicaciones a la regulación de frecuencia en la red eléctrica. Como se expuso arriba, en años recientes en colaboración con Enrique Mallada de Johns Hopkins hemos mostrado como la dinámica de sincronización de generadores electromecánicos puede analizarse con métodos y métricas tomadas del control robusto [PagM20]. Se obtiene una descomposición útil entre el movimiento del centro de inercia de la red, que refleja el desbalance energético global, y los errores de sincronización transitorios. Por otra parte, una línea de trabajo ya clásica en las redes eléctricas busca simplificar la dinámica de sincronización agrupando generadores coherentes, es decir aquellos que se mueven prácticamente al unísono [Chow13]. En ese sentido, consideramos que el enfoque de control robusto de [PagM20] puede aportar a la reducción del modelo, en particular la técnica de truncado balanceado (ver [DulP00]); nos propusimos investigar este tema en colaboración con el Prof. Mallada.

La segunda línea de aplicación propuesta tiene que ver con asignación de recursos en sistemas de computación en la nube. Como se expuso arriba, habíamos estudiado en un proyecto anterior el problema de escalado de capacidad, utilizando métodos de control y procesos estocásticos [GoFP17, GoFPJ17, GoFP18]. En esa línea teníamos aportes no publicados que faltaba cerrar, en particular contribuciones teóricas a los límites de fluido y difusión realizados en la tesis de maestría de Goldszajn. Culminar una publicación de revista con esos temas fue una meta del presente proyecto. Para continuar, el aspecto más prometedor surge de combinar distintas capas de decisión en un mismo problema de optimización: el escalado de capacidad, el balanceo de carga entre servidores y el agendado de tareas dentro de un servidor. En [PagGF19] formulamos el problema con variables "fluidas" en términos de optimización convexa, y demostramos cómo algunas de las políticas propuestas emergen naturalmente, y pueden extenderse mediante variantes de la dinámica primal-dual, aunque aparecen las oscilaciones y discontinuidades ya mencionadas. El abordaje a desarrollarse en el proyecto, es la utilización de penalidades del tipo proximal para suavizar la dinámica y conducir a métodos mejor comportados.

### **Metodología/diseño del estudio**

Las áreas de control, optimización convexa, y probabilidad aplicada en las que se desarrolla la contribución teórica del proyecto son carácter netamente matemático: se esperan resultados en forma de nuevos teoremas, con demostraciones no triviales llevadas a cabo en detalle. De todos modos, en la metodología de trabajo se utiliza activamente la simulación por computadora como forma de investigar los problemas a través de ejemplos, y formular o rechazar conjeturas: se trabaja con un contrapunto permanente entre el trabajo "de pizarrón" y en la computadora. Adicionalmente, al trasladar las contribuciones teóricas a las aplicaciones se utilizan simulaciones más completas, que incluyen detalles simplificados en los modelos, como por ejemplo simulaciones discretas lo más realistas posible para los problemas de computación en

la nube.

El trabajo teórico tiene prerequisites altos. Por otra parte, en este proyecto no se contaba con un estudiante ya formado para desempeñarse, el anterior (Goldsztajn) partió a fines de 2019 al exterior luego de su maestría. Por esta razón, la metodología propuesta fue de liderazgo de los investigadores senior (Paganini, Ferragut) en el trabajo teórico, con los colaboradores internacionales (Mallada, y se mantuvo el vínculo con Goldsztajn). Se preveía una visita al grupo de Mallada, que fue inviable por la pandemia y debió suplirse con trabajo virtual. Paralelamente, se preveía la incorporación de dos nuevas personas al grupo para iniciar su formación, incluyendo seminarios de estudio del estado del arte y cursos, que se acercarían a los temas planteados a través del trabajo de simulación. Se apuntaba a llegar, sobre finales del proyecto, a una participación más de fondo en alguna de las líneas propuestas.

Una dificultad en ese sentido fue el rezago de 9 meses en conseguir personas idóneas y dispuestas para este trabajo, en condiciones de pandemia. En ese contexto: la investigación procedió con los investigadores senior y colaboradores externos, llegando a buenos resultados en todas las líneas (ver abajo). Dado ese grado de avance al momento de incorporarse los jóvenes, se resolvió con ellos iniciar una línea de trabajo diferente, no prevista en el proyecto original pero también en la temática de control de redes distribuidas: concretamente, la optimización y operación de una infraestructura espacialmente distribuida de servicio, motivada por el problema de recarga de vehículos eléctricos. Esta aplicación está siendo desarrollada en otros proyectos del grupo, desde el punto de vista práctico. Aquí se buscó conectar con los métodos teóricos de optimización convexa propios del presente proyecto.

## Resultados, análisis y discusión

Detallamos los resultados haciendo referencia a cada uno de los objetivos específicos formulados en el proyecto.

Objetivo 1. Aportes teóricos al análisis de la dinámica de gradiente primal-dual y sus variantes; relación con los métodos proximales.

Como se detalló arriba, nos proponíamos investigar la relación entre la dinámica continua de gradiente primal-dual para resolver problemas de optimización convexa, y los métodos proximales, que incorporan un factor de regularización (penalidad cuadrática con variable auxiliar). Esta línea la desarrollamos en colaboración a distancia con Diego Goldsztajn, integrante anterior del grupo quien se desempeña hoy en TU Eindhoven.

Se introdujo un Lagrangiano regularizado, que incorpora al original la penalización  $\|x-z\|^2$  y minimiza en la variable  $x$ . Se demuestra que en condiciones extremadamente generales para el problema de optimización inicial (sin pedir diferenciablez, ni convexidad estricta), el Lagrangiano regularizado es suave y su dinámica de primal-dual es convergente al punto de silla deseado. El teorema generaliza las condiciones de convergencia conocidas. Los resultados fueron publicados en el artículo de revista:

[GolP21] D. Goldsztajn, D., F. Paganini, F. (2021). "Proximal regularization for the saddle point gradient dynamics". IEEE Transactions on Automatic Control, 66(9), 4385-4392. <https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3045124>

Objetivo 2. Contribuciones a la regulación de frecuencia en la red de potencia utilizando técnicas de teoría de control.

Se trabajó en la reducción de los modelos dinámicos para la sincronización electromecánica, en colaboración con el Prof. Mallada de Johns Hopkins University y su estudiante, Hancheng Min.

En particular, se utilizó la técnica de truncado balanceado con pesos en el dominio de la frecuencia, para generar una jerarquía de modelos de creciente orden, que proveen aproximaciones más fieles a la dinámica que otros existentes en la literatura. En particular, se observa que para una red eléctrica real (la de Islandia), con un modelo de 3er orden se logran por esta vía respuestas muy cercanas a la producida por modelos mucho más complejos.

Los resultados se publicaron en la publicación de revista [MinPM21], que además fue presentada en la American Control

Conference (ACC 2021), New Orleans, Mayo 2021.

[MinPM21] H. Min, F. Paganini, E. Mallada, E. (2021). "Accurate reduced-order models for heterogeneous coherent generators". IEEE Control Systems Letters, 5(5), 1741-1746.  
<https://doi.org/10.1109/LCSYS.2020.3043733>

Objetivo 3. Aportes a los problemas de asignación dinámica de recursos en sistemas cloud.

Por una parte, se completó el estudio del problema de escalado de capacidad, que fue tema de la tesis de maestría de Goldsztajn. El resultado aplicado es un método de control dinámico del número de instancias de servidores de un sistema de computación en la nube, que maneja el compromiso entre la latencia de servicio y el sobredimensionamiento de la capacidad activa. Desde el punto de vista teórico, requiere extensiones a los teoremas de [Kur78] sobre límites de fluido y de difusión de procesos de Markov. Los resultados fueron publicados en:

[GolFP21] D. Goldsztajn, A. Ferragut, F. Paganini (2021). "Automatic cloud instance provisioning with quality and efficiency". Performance Evaluation, 149-150.  
<https://doi.org/10.1016/j.peva.2021.102209>

Por otra parte, en la publicación [GolP21] ya citada se muestra que la metodología primal-dual con regularización proximal aplica a un problema de computación en la nube: la optimización conjunta de la capacidad activa en un conjunto de clusters de computadoras, el balanceo de carga entre los mismos, y el agendado de tareas dentro de cada cluster.

Objetivo 4. Formación de recursos humanos a nivel de grado o posgrado

Como ya fue mencionado, se demoró en este proyecto la incorporación de recursos humanos. Conseguir personas disponibles y calificadas para esta temática siempre es un desafío, pero fue agravado por la situación de la epidemia. A partir del mes 10 se incorporó un estudiante de maestría (Espíndola), perfil de ingeniería electrónica con interés por la matemática aplicada, pero sin formación previa en optimización convexa, por lo cual se realizó un seminario para introducirlo al tema. Posteriormente se incorporó un estudiante de grado (Marvid), de características similares y a quien se formó en un curso regular. Esta formación inicial no los ponía en condiciones de aportar a las líneas de los objetivos anteriores, que son más avanzadas y ya estaban en etapa de publicación de resultados.

Se optó por iniciar una línea diferente de investigación con ellos, la cual está en estado más embrionario por lo cual se puede explorar con trabajo de simulación. Está motivada por otros proyectos del grupo en el área de Energía, para el proyecto actual buscamos un problema de carácter fundamental, que describimos brevemente: supongamos que se dispone de una distribución en el espacio (por ejemplo, bidimensional) de la demanda por un servicio, y deben elegirse, dimensionarse y operarse estaciones discretas para cubrirla. La motivación proviene de puestos de recarga de vehículos eléctricos, pero la formulación abstracta es de interés más amplio. Hallar la asignación óptima incluye un problema de transporte óptimo, cuya formulación clásica viene de Monge y Kantorovich, pero que admite muchas variantes. Exploramos distintos problemas por una combinación de optimización convexa y pruebas empíricas por simulación. Nuestro primer trabajo en el tema fue recientemente enviado a un congreso:

[PagEMF22]. F. Paganini, E. Espíndola, D. Marvid, A. Ferragut, "Optimization of spatial infrastructure for EV charging", enviado a 2022 IEEE Conference on Decision and Control.

Como consecuencia, se considera haber logrado la iniciación en investigación de estos estudiantes. La misma se consolidará a través de tesis de posgrado futuras.

### Conclusiones y recomendaciones

El proyecto se desarrolló de forma muy satisfactoria desde el punto de vista científico, habiéndose obtenido resultados en todas las líneas planteadas, plasmados en 3 publicaciones en revistas de primer nivel internacional. El trabajo involucró dos colaboraciones internacionales, que se desarrollaron en forma virtual debido a los tiempos de pandemia. La formación de nuevos recursos humanos en el área fue parcialmente concretada, dada la incorporación tardía de los mismos.



## Referencias bibliográficas

- [AHU58] K. Arrow, L. Hurwicz, H. Uzawa, "Studies in linear and nonlinear programming", Stanford University Press, 1958.
- [BertsGal92] D. Bertsekas, R. Gallager, Data Networks, Prentice-Hall 1992.
- [BoyPCPE11] S. Boyd, N. Parikh, E. Chu, B. Peleato, and J. Eckstein, "Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers," *Found. Trends Mach. Learning*, vol. 3, no. 1, pp. 1–124, 2011.
- [CheT94] G. Chen, M. Teboulle, "A proximal-based decomposition method for convex minimization problems", *Mathematical Programming* 64, 81-101, 1994.
- [CheMC16] A. Cherukuri, E. Mallada, S. Low, J. Cortés, "Asymptotic convergence of constrained primal-dual dynamics", *Systems & Control Letters*, vol. 87, pp. 10-15, 2016.
- [CheMLC18] A. Cherukuri, E. Mallada, S. Low, J. Cortés, "The Role of Convexity in Saddle-Point Dynamics: Lyapunov Function and Robustness", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 63, No. 8, 2018.
- [ChiangLCD07] M. Chiang, S.H. Low, A.R. Calderbank, and J.C. Doyle, "Layering as optimization decomposition: A mathematical theory of network architectures." *Proceedings of the IEEE*, vol.95, pp 255-312, 2007.
- [Chow13] J. H. Chow, Power system coherency and model reduction. Springer, 2013.
- [DhiKJ18], N. K. Dhingra, S. Z. Khong, and M. R. Jovanovic, "The proximal augmented Lagrangian method for nonsmooth composite optimization," *IEEE Trans. Automat. Control*, 2018.
- [DroE13] G. Droge, M. Egerstedt, "Distributed Parameterized Model Predictive Control of Networked Multi-Agent Systems", *American Control Conference (ACC) Washington, DC, USA*, 2013.
- [DulP00] G.E. Dullerud, F. Paganini, "A Course in Robust Control Theory: a Convex Approach", *Texts in Applied Mathematics* 36, Springer-Verlag, New York 2000.
- [FeiP10] D. Feijer and F. Paganini, "Stability of Primal-dual gradient dynamics and application to network optimization", *Automatica*, Vol 46, No. 12, pp. 1974 – 1981, Dec 2010.
- [GhaC13] B. Ghahserifarda, J. Cortes, "Distributed convergence to Nash equilibria in two-network zero-sum games", *Automatica* 49 (2013) 1683–1692.
- ..
- [GolFP17] D. Goldsztajn, A. Ferragut, F. Paganini, "A feedback control approach to dynamic speed scaling in computing systems", *Conference on Information Sciences and Systems*, Johns Hopkins University, MD, EEUU, Marzo 2017.
- [GolFP17J] D. Goldsztajn, A. Ferragut, F. Paganini, "Controlling the number of active instances in a cloud environment", *Performance Evaluation Review*, Vol. 45, No. 3, Dec 2017.
- [GolFP18] D. Goldsztajn, A. Ferragut, F. Paganini, "Feedback control of server instances for right sizing in the cloud", *Proc. Allerton Conference*, Monticello, IL, pp. 749-756, Oct 2018.
- [GolPF19] D. Goldsztajn, F. Paganini, A. Ferragut, , "Proximal optimization for resource allocation in distributed computing systems with data locality", *Proc. Allerton Conference*, Monticello, IL, USA, pp. 773-780, Set 2019.
- [GolP21] D. Goldsztajn, F. Paganini (2021). "Proximal regularization for the saddle point gradient dynamics". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 66(9), 4385-4392.

<https://doi.org/10.1109/TAC.2020.3045124>

[GolFP21] D. Goldsztajn, A. Ferragut, F. Paganini (2021). "Automatic cloud instance provisioning with quality and efficiency". *Performance Evaluation*, 149-150.

<https://doi.org/10.1016/j.peva.2021.102209>

[KMT98] F. Kelly, A. Maulloo, D. Tan, "Rate control for communication networks: Shadow prices, proportional fairness and stability", *J. Oper. Res. Society*, vol 49, no 3. pp. 237-252 1998.

[Kur78] T. G. Kurtz, et al., "Strong approximation theorems for density dependent Markov chains", *Stochastic Processes and their Applications* 6 (3) (1978) 223-240.

[LinShSri06], X. Lin, N. Shroff and R. Srikant, "A Tutorial on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, August 2006, pp. 1452-1463

[LinWAT11], Lin, M, Wierman, A., Andrew, L. L., & Thereska, (2011). "Dynamic right-sizing for power-proportional data centers". *Proc. INFOCOM 2011*.

[LowPD02] S. Low, F. Paganini, J. Doyle, "Internet Congestion Control", *IEEE Control Systems Magazine*, February 2002.

[Lu et al11] Y. Lu, Q. Xie, G. Klier, A. Geller, J. R. Larus, and A. Greenberg, "Join-idle-queue: A novel load balancing algorithm for dynamically scalable web services," *Performance Evaluation*, vol. 68, no. 11, pp. 1056-1071, 2011.

[MallZL17], E. Mallada, C. Zhao, S. Low, "Optimal load-side control for frequency regulation in smart grids", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62 (12), 6294-6309, 2017.

[MinPM21] H. Min, F. Paganini, E. Mallada, E. (2021). "Accurate reduced-order models for heterogeneous coherent generators". *IEEE Control Systems Letters*, 5(5), 1741-1746.

<https://doi.org/10.1109/LCSYS.2020.3043733>

[PagGF19] F. Paganini, D. Goldsztajn, A. Ferragut, "An optimization approach to load balancing, scheduling and right sizing of cloud computing systems with data locality", *IEEE Conference on Decision and Control*, Nice, France, pp. 1114-1119, Dec 2019.

[PagM09] F. Paganini and E. Mallada, "A unified approach to congestion control and node-based multipath routing", *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol 17, No. 5, pp. 1413-1426, 2009.

[PagM17] F. Paganini, E. Mallada, "Global performance metrics for synchronization of heterogeneously rated power systems: The role of machine models and inertia", *Proc. Allerton Conference*, Monticello, IL, pp. 324-331, Oct 2017.

[PagM20] F. Paganini, E. Mallada, "Global analysis of synchronization performance for power systems: bridging the theory-practice gap", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol 65, no. 7, pp. 3007-3022, Jul 2020.

[PagEMF22]. F. Paganini, E. Espíndola, D. Marvid, A. Ferragut, "Optimization of spatial infrastructure for EV charging", enviado a 2022 *IEEE Conference on Decision and Control*.

[ParB13] N. Parikh and S. Boyd, "Proximal algorithms," *Foundations and Trends in Optimization*, vol. 1, no. 3, pp. 123-231, 2013.

[PatR17], S. Paternain, A. Ribeiro, "Online Learning of Feasible Strategies in Unknown Environments", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 62, No. 6, pp. 2807-2822, 2017.

[QuL18] G. Qu and N. Li, "On the exponential stability of primal-dual gradient dynamics," arXiv preprint, arXiv:1803.01825, 2018.

[TegBG15], E. Tegling, B. Bamieh, D. Gayme, "The price of synchrony: Evaluating the resistive losses in synchronizing power networks," IEEE Transactions on Control of Network Systems, vol. 2, no. 3, pp. 254–266, 2015.

[WangYTZ16]. Wang W, Zhu K., Ying L., Tian J., Zhang L, "Map Task Scheduling in MapReduce with Data Locality: Throughput and Heavy-Traffic Optimality", IEEE/ACM Trans. on Networking, Vol 24 (1), 2016.

[ZhangLP15], X. Zhang, N. Li, A. Papachristodoulou, "Achieving Real-time Economic Dispatch in Power Networks via a Saddle Point Design Approach", IEEE Power and Energy Society General Meeting, September 2015.

## **Licenciamiento**

Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. (CC BY-NC-ND)