

# Control de Carga-Frecuencia en Sistemas de Potencia Mediante Controladores Distribuidos

Diego Maldonado<sup>1</sup>, Silvana Gamboa<sup>1</sup>, Jackeline Abad<sup>1</sup>, Patricio Cruz<sup>1</sup> y Jaime Cepeda<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Automatización y Control industrial

<sup>2</sup>Departamento de Energía Eléctrica

Escuela Politécnica Nacional

Quito- Ecuador

{diego.maldonadoa, silvana.gamboa, jackeline.abad, patricio.cruz, jaime.cepeda}@epn.edu.ec

**Resumen**— Este documento presenta la introducción al planteamiento de una ley de control distribuido basado en la teoría de consenso de sistemas multi-agentes pero con aplicación en el control de carga frecuencia de un sistema eléctrico de potencia. La metodología propuesta se centra en el control del ángulo de rotor interno en el generador seleccionado, lo que permite que su governor actúe como un controlador distribuido que solo necesita mediciones locales como entrada. Adicionalmente, mediante un proceso de optimización, se logra primero establecer un conjunto de parámetros para cada controlador y, posteriormente, determinar las unidades de medición de fasores (phasor measurement unit – PMU) requeridas; así como dónde deben ser ubicadas. Posteriormente resultados, conclusiones y trabajos futuros son presentados como aportes de esta investigación.

**Keywords**—Sistemas Multi-agentes, control distribuido, Sistemas de Potencia, Optimización.

## I. INTRODUCCIÓN

Durante la última década ha crecido el interés en la investigación de sistemas multi-agentes ya que estos ofrecen soluciones efectivas para sistemas complejos, adaptativos y escalables mediante la reproducción de comportamientos presentes en la naturaleza [1]. Estos sistemas al estar compuestos por múltiples individuos interactúan entre sí para lograr una meta común; sin embargo, cada agente puede tener diferentes objetivos y percepciones locales del entorno. Por lo cual el control coordinado de todo el grupo de agentes es una tarea relativamente compleja [2].

Con el objetivo de resolver la problemática antes mencionada, una de las más recientes tendencias es la investigación y desarrollo de controladores distribuidos. Estos facultan a que cada agente sea capaz de tomar decisiones de manera autónoma [3], pero estableciendo reglas y restricciones que dirigen el comportamiento de todo el sistema hasta alcanzar un objetivo común. Como caso de estudio, uno de los sistemas más estudiados como sistema multi-agente corresponde al sistema de potencia. Estos interactúan dinámicamente para proporcionar energía eléctrica confiable y eficiente a los consumidores [4]–[7]. Por lo que, cada componente puede corresponder a un agente que tiene su propio conjunto de objetivos, limitaciones y decisiones. El control y el correcto funcionamiento de los sistemas de potencia han sido una preocupación para los investigadores durante las últimas décadas debido al alto impacto que ha tenido este sector en el desarrollo de las sociedades [8].

En este trabajo se propone investigar una metodología para realizar el control de frecuencia en sistemas eléctricos de potencia de manera distribuida basado en la teoría de sistemas multi-agentes. En particular, la propuesta es diseñar controladores distribuidos basado en la respuesta óptima de frecuencia del sistema. De esta manera, se integra la capacidad de controlar adecuadamente la máxima caída de frecuencia y su respuesta de recuperación ante desequilibrios entre la carga y generación. Además, como consecuencia de esta solución, también será posible abordar la ubicación óptima de PMUs para resolver el problema dinámico de la compensación de frecuencia en sistemas eléctricos. Esto permitirá expandir, mejorar y generalizar el uso del controlador distribuido propuesto, superando las limitaciones de otras metodologías. Finalmente, el análisis se enfoca en determinar las conclusiones del trabajo presentado.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2, se presenta los antecedentes. En la Sección 3, se presenta la metodología propuesta con el esquema de control distribuido. En la Sección 4, se detallan los resultados de las simulaciones obtenidas. Por último, se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

## II. ANTECEDENTES

Se toma como punto de partida el estudio realizado en [6], donde se introduce la propuesta de un controlador distribuido de carga-frecuencia, denominado D\_LFC (Distributed Load Frequency Control). Este se basa en la realimentación del ángulo del rotor del generador para introducirlo en la ley de control y establecer un consenso de segundo orden. Se asume que dicha medición es factible por la implementación de una PMU. La modelación del sistema de potencia corresponde a la ecuación de movimiento de un generador *ith* conectado a un sistema de *n* generadores [9], dada por (1)

$$\Delta\omega_{ri} = G_i \left( \Delta P_{mi} - \Delta P_{Li} - \sum_{j=1}^n T_{s_{ij}} \frac{\omega_o}{s} (\Delta\omega_{ri} - \Delta\omega_{rj}) \right) \quad (1)$$

Aquí:  $G_i = 1/(M_i s + D_i)$  corresponde a la función de transferencia del generador,  $\Delta\omega_{ri}$  es la desviación de velocidad  $M_i$  corresponde a la inercia del rotor,  $\Delta P_{mi}$  es la variación potencia mecánica,  $\Delta P_{Li}$  es la variación de potencia local,  $D_i$  es la constante de amortiguamiento de la carga,  $\delta_i$  es el ángulo interno del rotor,  $\omega_o$  es la velocidad angular de referencia, y  $T_{s_{ij}}$  es el torque de sincronismo.

El algoritmo de consenso viene dado primeramente por el control de la velocidad del generador y como segundo el control del ángulo interno del rotor [6]. La ecuación (2) presenta la ley de control para regular la participación con la inyección de potencia activa por parte del generador, en donde  $k_f$  se encarga de regular a la velocidad, mientras que  $k_p$  se encarga de regular las variaciones del ángulo.

$$\Delta P_{m_i} = -(k_{p_i} \Delta \delta_i + k_{f_i} \Delta \omega_{r_i}) H_{GT_i} \quad (2)$$

A través de esta ecuación, se logra implementar un control local que aprovecha la característica de consenso natural del sistema de potencia. De esta forma se regula la participación de generadores seleccionados por medio del control su ángulo interno, controlando así la potencia entregada. Con esto, se logra implementar un control distribuido y coordinado dentro de un sistema de potencia interconectado, fundamentado en la teoría de redes complejas. En este enfoque, los agentes, que representan los generadores, son controlados para regular la contribución de la potencia mecánica en función de sus propios parámetros, sus variables locales. Como resultado de la interacción natural, el efecto del control local se refleja en todo el sistema a través de las líneas de transmisión o enlaces de interconexión [6], [9].

### III. METODOLOGÍA

En este trabajo se propone un controlador distribuido para sistemas multi-agentes con aplicación en sistemas de potencia para el control de la respuesta en frecuencia del sistema. La Figura. 1 muestra el esquema general de control para cada uno de los agentes que conformar una unidad de generación.

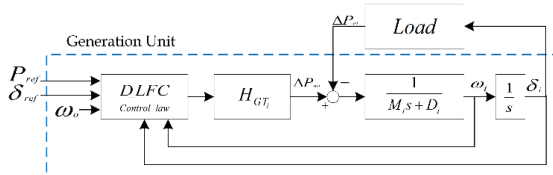


Figura. 1 Diagrama de control

Se propone mejorar el rendimiento del controlador distribuido para lo cual se plantea utilizar un proceso optimización heurística. La función objetivo consiste en la diferencia entre la respuesta de frecuencia medida del sistema respecto a una frecuencia de referencia, que en este caso ha sido elegida la curva de la trompeta con una amplitud reducida y sin desviación. La Figura. 2 muestra la respuesta en frecuencia para diferentes variaciones en un evento de cambio de carga  $\%p_k = [5, 10, 20]$ . En cada caso, seguirá su respectiva referencia dada por  $f_{ref_k}(t) = f_0 \pm A_k e^{-t/T}$ . Donde  $f_0$  es la frecuencia de operación del sistema.  $A_k$  es la máxima amplitud de desvío de la frecuencia y  $T$  es el periodo de establecimiento.

Para abordar este problema complejo, especialmente para el caso de un sistema multi-máquina con generadores heterogéneos, se propone definir un proceso de optimización de múltiples escenarios que considere distintos eventos de variación de carga  $\%p_k$ . Las variables de decisión corresponden a las constantes del controlador local para cada generador  $k_{p_i}$  y  $k_{f_i}$ . La función objetivo-propuesta se expresa en la ecuación (3).

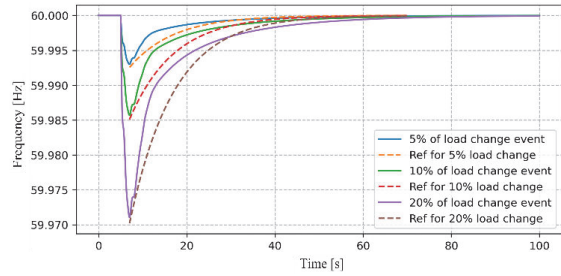


Figura. 2 Referencia de frecuencia

$$\min_{k_{p_i}, k_{f_i}} \sum_{k=1}^N \sum_{t_0}^{t_f} \frac{f_{ref_k}(t) - f_{mead_k}(t)}{\%p_k} \quad (3)$$

Sujeto a:

$$0 \leq k_{p_i} \leq k_{p_i}^{max}$$

$$0 \leq k_{f_i} \leq k_{f_i}^{max}$$

Donde:  $f_{mead_k}(t)$  y  $f_{ref_k}(t)$  son las frecuencias de referencia y de medición (obtenidas a partir de simulaciones) para un evento de variación de carga  $k$ , respectivamente.  $\%p_k$  es el porcentaje de variación de carga,  $t_0$  es el tiempo de inicio de comparación dado por el punto más bajo de la frecuencia, y  $t_f$  es el tiempo de finalización de la comparación al restablecer la frecuencia.

Correspondiente con la ubicación óptima de PMU con capacidad para medir el ángulo del rotor, esta se da por consecuencia de la solución del problema de optimización propuesto. Si dentro de la solución existe una constante de regulación del ángulo del rotor diferente de cero ( $k_{p_i} \neq 0$ ) significa que participará en la regulación de frecuencia. Por lo tanto, se requiere instalar una PMU en dicho generador.

### IV. RESULTADOS

La metodología propuesta ha sido implementada en el sistema de prueba IEEE de 39 buses con un grupo de 10 generadores, ver Figura. 3. Los resultados del comportamiento de frecuencia para una prueba con el aumento del 20% de carga después del proceso de optimización heurística son presentados en la Figura. 4. La línea azul sólida representa la mejor respuesta de frecuencia después de finalizar el proceso de optimización de la parametrización de los controladores distribuidos resuelta por MVMO (Mean-variance mapping optimization). Las líneas punteadas representan la evolución de las partículas a través del algoritmo hasta obtener la mejor solución.

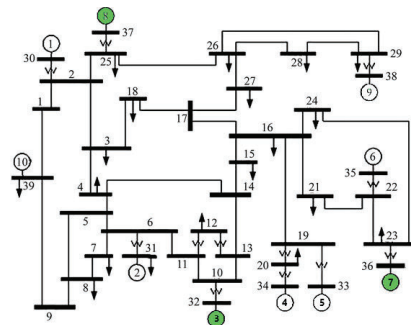


Figura. 3 Sistema de prueba IEEE-39 barras con ubicación de PMU's

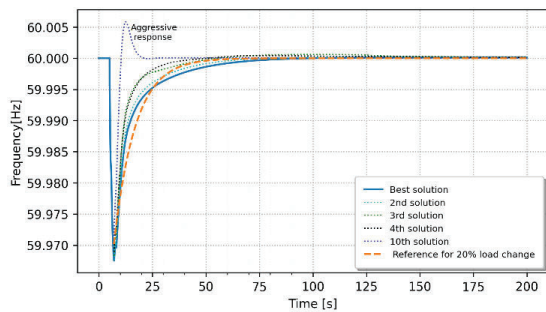


Figura. 4 Respuesta Óptima de referencia

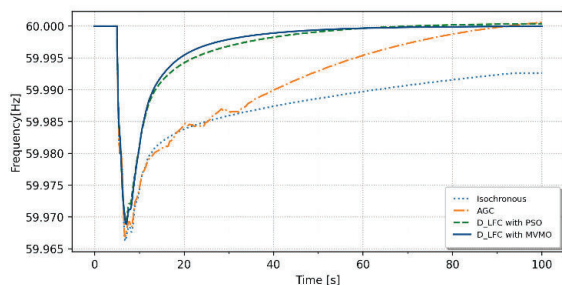


Figura. 5 Comparación de la respuesta en frecuencia del sistema con respecto a modos de control tradicionales.

La frecuencia describe un comportamiento esperado, ya que después de un evento de carga, logra volver al valor nominal, intentando ser lo más similar posible a la referencia. La mejor solución ocurre cuando los generadores 1, 2, 4, 5, 6, 9 y 10 solo operan en el control de frecuencia primaria durante la transición, contribuyendo con sus reservas de potencia, mientras que los generadores 3, 7 y 8 deben tener un PMU instalado con la capacidad de medir el ángulo del rotor y son los que finalmente absorben la carga entrante para permitir que el sistema completo regrese a un punto de operación normal dentro de los valores permitidos. En la Figura. 3 se muestra la ubicación óptima de los tres PMU requeridos como resultado de la metodología aplicada para el sistema de prueba IEEE de 39 buses

El esquema propuesto de control distribuido es capaz de devolver primero la frecuencia a su valor nominal, en comparación con la respuesta del AGC y el control isócrono, como se muestra en la Figura. 5. Esto se debe a que la propuesta permite a los controladores distribuidos realizar también el control secundario de frecuencia, sincronizado bajo la misma ley de control primario, ubicada cerca de los eventos de perturbación, lo que les permite realizar un consenso y llevar a cabo acciones correctivas de manera oportuna frente a la perturbación.

## V. CONCLUSIONES

El presente trabajo propone una metodología para la optimización de parámetros del esquema de control distribuido, con el objetivo de resolver el problema de carga-frecuencia (LFC) dentro del sistema de energía eléctrica. El método propuesto se basa en la medición y control del ángulo de rotor interno de generadores seleccionados, y sus principales contribuciones son las siguientes:

- Determinación de los parámetros óptimos para los controladores D\_LFC.
- Diseño óptimo de la respuesta de frecuencia del sistema, con la capacidad de controlar adecuadamente la caída máxima de frecuencia y la recuperación de respuesta causada por desequilibrios entre la carga y la generación.
- Resolución del problema de ubicación óptima de PMU (Unidades de Medición Fasorial) para abordar el problema dinámico de D\_LFC. No todos los generadores del sistema requieren un PMU.

Los resultados experimentales de simulación validan la efectividad de esta propuesta, ya que elimina las desviaciones de frecuencia y potencia transferida en el sistema, siguiendo una referencia con un comportamiento suave y progresivo. El trabajo futuro se enfoca en varios temas, como implementar la estrategia de control propuesta en un sistema multi-máquina real, considerar eventos aún más agresivos, e incluir el intercambio de energía para completar el Control de Frecuencia de Carga (LFC). Además, se abre la posibilidad de estudiar la integración de este esquema de control distribuido junto con controladores especializados con características robustas, como controladores difusos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por la beca de investigación PIS-21-01 de la Escuela Politécnica Nacional.

## REFERENCIAS

- [1] A. Dorri, S. S. Kanhere, and R. Jurdak, "Multi-Agent Systems: A Survey," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28573–28593, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2831228.
- [2] H. Geng, H. Wu, J. Miao, S. Hou, and Z. Chen, "Consensus of Heterogeneous Multi-Agent Systems Under Directed Topology," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 5936–5943, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3142539.
- [3] V. Singhal and D. Dahiya, "Distributed task allocation in dynamic multi-agent system," in *International Conference on Computing, Communication & Automation*, IEEE, May 2015, pp. 643–648. doi: 10.1109/CCA.2015.7148452.
- [4] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Review of Active and Reactive Power Sharing Strategies in Hierarchical Controlled Microgrids," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 32, no. 3, pp. 2427–2451, Mar. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2569597.
- [5] Y. S. Foo, Eddy, H. B. Gooi, and S. X. Chen, "Multi-Agent System for Distributed Management of Microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 24–34, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2322622.
- [6] D. M. Andrade, S. Gamboa, and J. A. Torres, "Distributed load-frequency control in power systems," in *2020 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2020*, 2020. doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272070.
- [7] A. M. Farid, "Multi-Agent System Design Principles for Resilient Coordination & Control of Future Power Systems," *Intelligent Industrial Systems 2015 1:3*, vol. 1, no. 3, pp. 255–269, May 2015, doi: 10.1007/S40903-015-0013-X.
- [8] J. Romero Aguero, A. Khodaei, and R. Masiello, "The Utility and Grid of the Future: Challenges, Needs, and Trends," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 14, no. 5, pp. 29–37, Sep. 2016, doi: 10.1109/MPE.2016.2577899.
- [9] S. del P. Gamboa Benítez, "Metodología para el diseño de un sistema integrado WAMPAC de gran escala basado en una arquitectura de control distribuido," Thesis, Universidad de San Juan, 2019.