



Comparación entre sistemas Distribuidos de Control y sistemas SCADA: Caso de Estudio de la distribución de Energía Eléctrica

Comparison between Distributed Control Systems and SCADA Systems: Case Study of Electric Power Distribution

Comparaçãõ entre sistemas de Controlo Distribuído e sistemas SCADA: Caso de Estudo de Distribuição de Energia Elétrica

Franklin Cesar Ramírez-Baquerizo ¹
facebaque@hotmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-8228-9465>

Correspondencia: facebaque@hotmail.com

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

* **Recibido:** 05 de junio de 2024 * **Aceptado:** 17 de julio de 2024 * **Publicado:** 27 de agosto de 2024

I. Ingeniero Eléctrico, Especialización Electrónica y Automatización Industrial, Ecuador.

Resumen

Los sistemas de control DCS y SCADA han sido a lo largo del tiempo los más utilizados dentro de la automatización industrial para el control de procesos, inclusive ya no solo manejan data como tal, sino que manejan sistemas, como los conocidos de power and energy. Su diferencia principal como se abaliza en el artículo es la base de datos y el manejo de la información en sus niveles, como se lo estudiará en el transcurso del texto. Los componentes altamente estandarizados llegan a poseer inclusive niveles de seguridad que permiten la disminución de probabilidades de falla y llevan hacia una parada segura. Se mantienen arquitecturas redundantes dependiendo de la complejidad del proceso, además de que, dependiendo del número de sistemas, maquinas, clientes o aplicaciones la programación se realiza de manera más sencilla o hasta con licencias infinitas.

Palabras Clave: DCS; SCADA; Control; PLC; HMI.

Abstract

DCS and SCADA control systems have been the most widely used in industrial automation for process control over time, and they no longer only manage data as such, but also manage systems, such as those known as power and energy. Their main difference, as highlighted in the article, is the database and the management of information at its levels, as will be studied throughout the text. Highly standardized components even have security levels that allow the reduction of failure probabilities and lead to a safe stop. Redundant architectures are maintained depending on the complexity of the process, and depending on the number of systems, machines, clients or applications, programming is done more easily or even with infinite licenses.

Keywords: DCS; SCADA; Control; PLC; HMI.

Resumo

Os sistemas de controlo DCS e SCADA têm sido os mais utilizados na automação industrial para o controlo de processos ao longo do tempo, e já não só lidam com dados como tal, como também gerem sistemas, como os conhecidos por potência e energia. A sua principal característica distintiva, conforme referido no artigo, é a base de dados e a gestão da informação nos seus níveis, como será estudado ao longo do texto. Os componentes altamente padronizados possuem ainda níveis de segurança que reduzem a probabilidade de falha e levam a uma paragem segura. As arquiteturas redundantes são mantidas dependendo da complexidade do processo, além disso,

dependendo da quantidade de sistemas, máquinas, clientes ou aplicações, a programação é realizada de forma mais simples ou mesmo com licenças infinitas.

Palavras-chave: DSC; SCADA; Controlar; CLP; IHM.

Introducción

Distintos proyectos pilotos en muchos países del mundo están explorando el potencial de las micro redes para promover su incorporación a la red eléctrica, y hacer un sistema menos vulnerable a interrupciones, entre otros objetivos. Dichos proyectos buscan desarrollar una red menos centralizada, lo que requiere grandes inversiones en tecnología y entrenamiento, así como el desarrollo de políticas y estándares. Sin embargo, hoy en día las micro redes representan una muy pequeña porción de la totalidad de la red, por ejemplo, en Estados Unidos de América se estima que hay 1.1GW de capacidad instalada, y para el 2030 será de 8.7GW.

En otras partes del mundo, sugieren que las micro redes están jugando un papel importante haciendo que las redes eléctricas sean más robustas frente a las perturbaciones, aumentando su resiliencia. El caso más notable fue el sucedido durante el terremoto y posterior tsunami en Japón en 2011 en la región de Tohoku, donde la micro red de la Tohoku Fukushi University de 1MW operó por 2 días en modo aislado, luego del evento sísmico, mientras la región alrededor se quedó sin servicio eléctrico. La micro red localizada se mantuvo operativa con alto nivel de desempeño supliendo a las cargas, inclusive las cargas de demanda pico a nivel de potencia con un factor aceptable. Se está gestando en el mundo una mirada hacia las oportunidades que ofrecen las micro redes en este tipo de situaciones. Una característica clave de las micro redes es que pueden incluir una amplia variedad de medios de generación y cargas. Para desarrollar la tecnología que integre a los micros redes al sistema eléctrico son necesarios laboratorios multifuncionales, que incorporen fuentes de generación, de almacenamiento, y las cargas.

Resulta relevante que las cargas tengan medios de almacenamiento, como son las baterías y supercapacitores. Aquí empieza a definirse la importancia de los sistemas de gestión de carga, o de despacho, que a nivel de micro red de energía se denominan sistemas de control. Estos permiten que la gestión de entregar carga sea eficiente, tomando en consideración inclusive los costes económicos de la operación y la vida útil de los elementos. Estos son proyectos de micro redes activas y operativas alrededor del mundo, que envuelven pruebas y evaluación de los conceptos que se usarán en la futura red, y se desarrollan actualmente en varios países. Denotando lo que

sistemas de control se refiere, el sistema SCADA tradicional se basa en la recolección, procesamiento y análisis de datos en tiempo real desde algún proceso. Este sistema requiere de personal capacitado para la operación y control de los dispositivos a través de una interfaz HMI (del inglés Human Machine Interface). Por el contrario, el Social SCADA propone implementar HMIs simplificadas para facilitar el intercambio de información entre el sistema y la comunidad donde se instale la micro red.

En esta propuesta los operadores sólo necesitan formación básica para interactuar con el sistema. En la Figura 2, podemos ver como se conforma una red SCADA tradicional, inclusive se hace evidente el concepto de Social SCADA para micro redes eléctricas que se presenta como la suma del componente social (comunidad), y las tradicionales aplicaciones SCADA (técnico).



Figura 1: Niveles de composición del sistema SCADA

Un sistema SCADA es una aplicación que permite monitorear, operar, controlar y supervisar un sistema con componentes distribuidos, cuando la adquisición de datos y el control centralizado es importante. El sistema también incluye la capacidad de análisis requeridos en un motor de cálculo, y un conjunto de interfaces hechas a la medida para que los operadores interactúen con los equipos instalados en campo. Estas interfaces implementan varios enlaces en el sistema, incluyendo:

- a) La conexión de las RTU`s (del inglés Remote Terminal Units) instaladas en el campo, para ejercer acciones de control, obtener datos y almacenarlos para su tratamiento.
- b) La conexión desde el centro de procesamiento a los HMI`s para interactuar con los operadores.

- c) La conexión desde el centro de procesamiento al campo, transmitiendo todas las acciones de control emitidas por el centro de procesamiento (de forma automática) y por los operadores (manualmente).

A pesar de que la mayoría de los principales proveedores de sistemas SCADA han basado sus esquemas en sistemas propietarios, los clientes valoran cada vez más las arquitecturas de sistemas abiertos y el uso de protocolos de comunicación estándar sobre WAN (del inglés Wide Área Network), utilizando las conexiones Ethernet. La particularidad de este estudio, a diferencia de otros, es analizar un sistema SCADA como parte de la solución energética, comprendiendo que la sustentabilidad en el largo plazo se basa en la apropiación que haga la comunidad del sistema, para que sea ésta quien lo maneje apropiadamente, tomando ventaja de las funciones del SCADA para proveer información en tiempo real acerca del estado de la micro red. Es por esto que el sistema incluye una pantalla táctil ubicada en el centro comunal, donde la comunidad puede interactuar con el sistema energético, mostrando información de forma clara y fácil de entender.

Materiales y Métodos

Funciones de un sistema SCADA

Permiten mejorar la toma de decisiones y garantizar un rendimiento óptimo en entornos industriales y de automatización. El sistema SCADA comprende varias acciones y utilidades cuya finalidad es tener una comunicación clara entre el proceso y el operador, las más destacadas son:

- a) Monitorización, que permite la visualización en tiempo real de datos provenientes de autómatas, como temperaturas y velocidades, permitiendo la supervisión de máquinas simples o instalaciones a larga distancia.
- b) Supervisión, que permite el control y adquisición de datos de un proceso, con herramientas para la toma de decisiones. Permite ejecutar programas para supervisar y modificar el control, evitando una supervisión constante por parte de humanos. • Adquisición de Datos.

Se logra mediante herramientas registradoras que recopilan datos para evaluarlos posteriormente. Además, se visualizan estados de señales, reconociendo eventos excepcionales y notificando a los operarios para acciones correctivas.

- a) El mando es la capacidad de que los operadores cambien consignas y datos clave directamente desde el ordenador, como iniciar, detener o modificar parámetros facilitando los cambios.
- b) Grabación de Acciones o Recetas, que permite configurar procesos recurrentes con una sola orden. Por ejemplo, se pueden accionar varios procesos con un solo interruptor y programar los parámetros de funcionamiento.
- c) Seguridad en Accesos. Se logra restringiendo zonas de programa a usuarios autorizados, registrando todas las acciones realizadas por operadores no autorizados.
- d) Programación Numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de alta resolución directamente en la CPU haciendo uso de lenguajes de alto nivel como C y Visual Basic.

Arquitectura básica de un sistema SCADA

Las primeras exploraciones enfocadas en la automatización centralizaban todo el control en la computadora personal y gradualmente se inclinaban hacia la distribución del control en la planta. El usuario, a través de herramientas de visualización y control, interactúa con un Sistema de Control de Proceso que reside en un servidor, la comunicación entre estos sistemas se realiza a través de redes de comunicación, el sistema de proceso monitorea y controla el sistema utilizando sensores y actuadores transmitiendo datos a través de buses de campo donde la información generada se almacena para su posterior análisis. Una estructura funcional obedece la estructura Maestro-Eslavo, donde la estación central (Maestro) se comunica con el resto de estaciones (Eslavo) a través de una serie de acciones.

Hardware

Se refiere a la parte física y tangible de un sistema informático o electrónico, incluye todos los componentes que se pueden tocar y que componen el dispositivo o sistema electrónico. Un sistema SCADA necesita componentes físicos para procesar y administrar la información recopilada, los mismos que se presentan a continuación:

- a) Ordenador central o MTU. Conocido como unidad terminal maestra, se refiere al componente central del sistema que monitorea la información de las subestaciones, ya sea a través de otros ordenadores conectados a instrumentos de campo en sistemas complejos o directamente sobre dichos instrumentos. Generalmente, este ordenador es una PC que

respalda la HMI. Entre sus funciones principales se encuentran: Adquisición de datos, tendencias, procesamiento de alarmas, control, informes, mantenimiento del sistema de respaldo en caso de fallos, interfaces con otros sistemas, seguridad, administración de red, administración de la base de datos, aplicaciones especiales y sistemas de modelado.

- b) Ordenadores remotos o RTU. Conocidos como unidades terminales remotas, son ordenadores los cuales están ubicados estratégicamente en nodos del sistema, supervisan y controlan las subestaciones, reciben señales de sensores de campo y gestionan los elementos finales de control mediante el software SCADA. Operan en un nivel intermedio de automatización.
- c) Red de comunicación. Este nivel administra la información enviada por los instrumentos de campo a la red de ordenadores en el sistema SCADA. Las comunicaciones en un sistema SCADA suelen ser a través de redes WAN (Red de Área Amplia), lo que implica que los terminales RTU pueden estar geográficamente descentralizados. En cuanto a los instrumentos de campo, cumplen funciones tanto de control (PLC, controladores industriales, actuadores) como de captación de información (sensores y alarmas).

Software

Se refiere a los programas y datos que dan órdenes e instrucciones al hardware sobre cómo realizar tareas específicas, en otras palabras, es la parte lógica e intangible de un sistema que proporciona funcionalidad al hardware. Los módulos o bloques software que permiten las actividades de adquisición, supervisión y control son los siguientes:

- a) Configuración. Permite al usuario configurar el entorno de trabajo de la aplicación, definiendo la disposición de pantallas y los niveles de acceso para diferentes usuarios. Se pueden especificar pantallas gráficas o de texto, importándolas desde otra aplicación o creándolas directamente en el SCADA. Incluye un editor gráfico que facilita la creación mediante dibujo a nivel de píxel o la utilización de elementos estándar como líneas, círculos, textos o figuras, con funciones de edición como copiar, mover y borrar. Además, durante la configuración, se eligen los drivers de comunicación para la conexión con los elementos de campo, se decide la conexión en red de estos elementos, se selecciona el

puerto de comunicación en el ordenador, se establecen sus parámetros y permite la visualización de variables.

Otro protocolo a usar es el AGA y los DCS. Ambos representan una solución segura. Para reducir el coste de los dispositivos SCADA y su gestión, se utilizan técnicas criptográficas de clave simétrica. De hecho, debido a la lentitud de las operaciones de la criptografía de clave pública, los protocolos criptográficos de clave pública podrían introducir retrasos en la transmisión de mensajes que no son aceptables para los protocolos SCADA. La propiedad de seguridad semántica se utiliza para garantizar que un fisgón no tenga información sobre el texto plano, aunque vea múltiples cifrados del mismo texto plano. Por ejemplo, aunque el atacante haya observado los textos cifrados de «apagar» y «encender», no le servirá para distinguir si un nuevo texto cifrado es el cifrado de «apagar» o «encender». En la práctica, la técnica de aleatorización se utiliza para lograr este objetivo. Por ejemplo, el emisor del mensaje puede propender una cadena aleatoria (por ejemplo, 128 bits para AES-128) al mensaje y utilizar modos de cifrado especiales como el modo de cifrado por bloques encadenados (CBC) o el modo Hash-CBC (HCBC). En algunos modos, esta cadena aleatoria se denomina vector de inicialización (IV).

Esto evita la fuga de información del texto cifrado incluso si el atacante conoce varios pares de texto plano/texto cifrado con la misma clave. Dado que los enlaces de comunicación SCADA pueden ser tan bajos como 300bps y que generalmente se requiere una respuesta inmediata, no hay suficiente ancho de banda para enviar la cadena aleatoria (IV) cada vez con el texto cifrado, por lo que necesitamos diseñar diferentes mecanismos criptográficos para lograr la seguridad semántica sin sobrecarga de transmisión adicional. Se suele usar dos contadores compartidos entre dos socios comunicantes, uno para cada dirección de comunicación. Los contadores se ponen inicialmente a ceros y deben tener al menos 128 bits, lo que garantiza que los valores del contador nunca se repetirán, evitando ataques de repetición. El contador se utiliza como vector de inicialización (IV) en el cifrado de mensajes si se utiliza el modo CBC o HCBC. Después de cifrar cada mensaje, el contador se incrementa en uno si se utiliza el modo CBC y en el número de bloques de datos cifrados si se utiliza el modo HCBC. Se supone que los dos socios que se comunican conocen los valores de los contadores y no es necesario añadirlos a cada texto cifrado. Los mensajes pueden perderse y es necesario sincronizar los dos contadores de vez en cuando (por ejemplo, fuera de las horas punta).

Un sencillo protocolo de sincronización de contadores para el conjunto de protocolos SCADA. El protocolo de sincronización de contadores también podría iniciarse cuando aparecen algunos errores de cifrado/descifrado debido a contadores no sincronizados. Para que dos dispositivos SCADA establezcan un canal seguro, es necesario arrancar una clave secreta maestra en los dos dispositivos en el momento del despliegue (o cuando se despliega un nuevo dispositivo SCADA en la red existente). En la mayoría de las configuraciones, los canales seguros sólo son necesarios entre un dispositivo SCADA maestro y un dispositivo SCADA esclavo. Para algunas configuraciones, también pueden ser necesarios canales seguros entre dispositivos SCADA esclavos. El canal seguro identificado con este secreto maestro se utiliza para establecer otros canales como canales seguros de sesión, canales de sincronización de tiempo, canales de difusión autenticados y canales de emergencia autenticados. Supongamos que $H(-)$ es una función pseudoaleatoria (por ejemplo, construida a partir de SHA-256) y que dos dispositivos SCADA A y B comparten un secreto $K_{AB} = K_{BA}$. Dependiendo de la política de seguridad, esta clave K_{AB} podría ser el secreto maestro compartido o un secreto compartido para una sesión que podría establecerse a partir de la clave maestra compartida utilizando un protocolo simple de establecimiento de claves (para lograr la frescura de la clave de sesión, normalmente un nodo envía un nonce aleatorio al otro y el otro nodo envía la clave de sesión cifrada junto con un autenticador en el texto cifrado y el nonce aleatorio).

Resultados

Los rápidos avances en la parte computacional y de comunicación de los sistemas empotrados están allanando el camino hacia dispositivos en red altamente sofisticados que podrán llevar a cabo diversas tareas no de forma autónoma, como suele hacerse hoy, sino teniendo plenamente en cuenta la información dinámica y específica del contexto. Estos «objetos» podrán cooperar, compartir información, actuar como parte de comunidades y, en general, ser elementos activos de un sistema más complejo. El ámbito de los objetos cooperantes es una sección transversal entre los sistemas integrados (en red), la informática ubicua y las redes de sensores (inalámbricas). Una definición inicial procedente del proyecto cofinanciado por la Comisión Europea CONET afirma que Los Objetos Cooperantes consisten en dispositivos informáticos integrados equipados con capacidades de comunicación, detección o actuación capaces de cooperar y organizarse autónomamente en redes para realizar una tarea común. La visión de los objetos cooperantes es abordar la complejidad

emergente mediante la cooperación y el modularidad. Para ello, la capacidad de comunicarse e interactuar con otros objetos o con el entorno es un requisito previo fundamental. Aunque en muchos casos la cooperación es específica de la aplicación, la cooperación entre dispositivos heterogéneos puede apoyarse en abstracciones compartidas.

Esperamos que los sistemas SCADA/DCS de próxima generación aprovechen este comportamiento emergente y lo integren en su funcionalidad. Como tal, la lógica de gobierno puede ser expresada de una manera orientada a objetivos asignados a las comunidades de objetos que cooperan con el objetivo de satisfacer los requisitos del proceso de negocio. D. Virtualización y computación en nube En el mundo de las TI asistimos a una tendencia hacia la virtualización de recursos como plataformas de hardware, sistemas operativos, dispositivos de almacenamiento, recursos de red, etc. La virtualización responde a muchas necesidades empresariales de escalabilidad, uso más eficiente de los recursos y reducción del coste total de propiedad (TCO), por nombrar sólo algunas. La computación en nube está surgiendo impulsada por la adopción generalizada de la virtualización, la arquitectura orientada a servicios y la computación utilitaria. Se accede a los servicios de TI a través de Internet y las herramientas y aplicaciones locales (normalmente a través de un navegador web) ofrecen la sensación de estar instaladas localmente. Sin embargo, el cambio de paradigma importante es que los datos se computan en la red, pero no en lugares conocidos a priori.

Normalmente la infraestructura física no es propiedad y existen varios modelos de negocio que contemplan el pago por uso orientado al acceso. Esta tendencia informática afecta ya a las aplicaciones informáticas, pero también puede afectar a cómo se diseñen las aplicaciones industriales en el futuro y a cómo se integren con los servicios ofrecidos externamente. Los sistemas multi núcleo y GPU computing y la mayoría de los sistemas industriales se construyen a largo plazo y con tecnologías probadas. Sin embargo, desde 2005 hemos asistido a la aparición de sistemas multinúcleo, que hoy en día también existen en los smartphones normales. La tendencia general es hacia chips con decenas o incluso centenares de núcleos. Funciones avanzadas como el multithreading simultáneo, la memoria en chip, etc. prometen un alto rendimiento y una nueva generación de aplicaciones paralelas nunca vistas en sistemas embebidos. Además, en la última década hemos asistido a la aparición de la computación GPU, en la que las tarjetas gráficas aprovechan su enorme capacidad de cálculo en coma flotante para realizar procesamiento de flujos. Para determinadas aplicaciones, esto puede suponer un desafío.

Además, la reciente tendencia a integrar funciones gráficas en los procesadores (microprocesadores con capacidad gráfica, GEM), como Sandy Bridge de Intel y Fusion de AMD, puede implicar que las capacidades de cálculo de la GPU estén disponibles para cualquier tipo de dispositivo que albergue uno de esos procesadores. Un híbrido CPU/GPU de este tipo puede ser incluso más eficiente al eliminar la lenta comunicación entre la CPU y la GPU. Los procesadores con capacidad gráfica incorporada que se instalarán en 2011 en 115 millones de portátiles representan la mitad de los envíos totales, y en 63 millones de PC de sobremesa suponen el 45% de la cifra total.

En 2014, el 83% de los portátiles y el 76% de los ordenadores de sobremesa del mundo se comercializarán con microprocesadores con capacidad gráfica [7]. La computación multinúcleo y GPU tendrá un impacto en el diseño actual de los sistemas SCADA/DCS, ya que ahora pueden desplegarse enfoques más sofisticados y, por ejemplo, el análisis de los procesos, la producción y los recursos puede realizarse de forma rentable incluso en el punto de acción y no en el sistema SCADA maestro, como se hacía tradicionalmente según la evolución.

Conclusiones

Los dispositivos preparados para SOA en el futuro, surgirá una infraestructura mucho más diversificada y la forma de interactuar con ella cambiará significativamente. Se creará un mashup de servicios, que podrán combinarse y utilizarse de forma multicapa. Las aplicaciones empresariales podrán conectarse directamente a los dispositivos si es necesario, sin necesidad de utilizar controladores propietarios, mientras que los dispositivos no habilitados para servicios web podrán seguir conectados y su funcionalidad envuelta por mediadores de servicios o en la capa de middleware. La comunicación peer to peer entre los dispositivos ya está haciendo descender los conceptos SOA hasta la capa de dispositivo y creando nuevas oportunidades para el descubrimiento de funcionalidades y la colaboración, como se ha demostrado. Los sistemas embebidos en red se han vuelto más potentes en cuanto a potencia de cálculo, memoria y comunicación, por lo que están empezando a construirse con el objetivo de ofrecer su funcionalidad como uno o más servicios para su consumo por otros dispositivos o servicios.

Debido a estos avances, estamos asistiendo lentamente a un cambio de paradigma en el que los dispositivos pueden ofrecer un acceso más avanzado a su funcionalidad e incluso albergar y ejecutar inteligencia empresarial, por lo que proporcionan efectivamente los bloques de construcción para la expansión de los conceptos de arquitectura orientada a servicios hasta su capa.

De este modo, la información basada en eventos puede adquirirse, procesarse en el dispositivo y en la red, sin necesidad de almacenamiento en bases de datos intermedias ni procesamiento por terceros, y finalmente transmitirse a los procesos empresariales correspondientes. Esta capacidad abre nuevas vías para enfoques más dinámicos y sofisticados, que aprovechen las especificidades contextuales disponibles. Los servicios web son adecuados y capaces de funcionar de forma nativa en dispositivos integrados, proporcionando una capa de interoperabilidad y un fácil acoplamiento con otros componentes en entornos altamente heterogéneos.

Device Profile for Web Services (DPWS) y OPC UA son tecnologías emergentes para la realización de controladores y dispositivos habilitados para servicios web. Varios proyectos como SIRENA (www.sirena-itea.org), SODA (www.soda-itea.org) y SOCRADES (www.socrades.eu) han experimentado con dispositivos de automatización industrial preparados para SOA y su integración en aplicaciones industriales. IV. SCADA/DCS DE PRÓXIMA GENERACIÓN Hemos explorado varias tendencias de TI que consideramos que pueden cambiar significativamente la forma en que diseñamos, implementamos y desplegamos las aplicaciones industriales en el futuro. Los sistemas SCADA/DCS de próxima generación tendrán que hacer frente a una cantidad mucho mayor de datos e información distribuidos y diversos en tiempo real y tomar decisiones basadas en la cooperación con datos e información internos y externos adquiridos y expuestos como «servicios».

Se presume una visión de cómo puede ser la próxima generación de sistemas SCADA/DCS. Podemos identificar los siguientes cambios principales en toda la infraestructura: ahora está impulsada por la información y todas las interacciones se realizan a través de servicios (web) de forma plana. Desde el punto de vista de SOA, todos los sistemas (por ejemplo, ERP, PLC, SCADA/DCS heredados, dispositivos, MES, etc.) exponen su funcionalidad (compleja o atómica) como un servicio que puede componerse e interactuar con otras entidades. La lógica se aloja donde tiene sentido (empresarial).

Referencias

1. Shid, Y. (2021). Pontryagin's minimum principle based fuzzy adaptive energy management for hybrid electric vehicle using real-time traffic information. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116341>

2. Maino, C. (2021). Optimal mesh discretization of the dynamic programming for hybrid electric vehicles. **Applied Energy**. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116477>
3. Zhou, Q. (2023). A tolerant sequential correction predictive energy management strategy of hybrid electric vehicles with adaptive mesh discretization. **Energy**. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127459>
4. Li, G., et al. (2017). Battery SOC constraint comparison for predictive energy management of plug-in hybrid electric bus. **Applied Energy**, 190, 197-209. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.103>
5. Xie, S. (2019). Pontryagin's Minimum Principle based model predictive control of energy management for a plug-in hybrid electric bus. **Applied Energy**, 233-234, 416-425. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.078>
6. Guo, N. (2021). Real-time predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicles for coordination of fuel economy and battery degradation. **Energy**. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120129>
7. Xie, S. (2019). Model predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles considering optimal battery depth of discharge. **Energy**, 168, 228-240. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.129>
8. Zhang, X. (2021). Bi-level energy management of plug-in hybrid electric vehicles for fuel economy and battery lifetime with intelligent state-of-charge reference. **Journal of Power Sources**, 490, 229604. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229604>
9. Guo, H., et al. (2019). State-of-charge-constraint-based energy management strategy of plug-in hybrid electric vehicle with bus route. **Energy Conversion and Management**, 185, 440-451. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.025>
10. Zhou, Q., et al. (2021). A two-term energy management strategy of hybrid electric vehicles for power distribution and gear selection with intelligent state-of-charge reference. **Journal of Energy Storage**, 42, 103272. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103272>

© 2024 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).