

# RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL

## DATOS DEL/ DE LA DOCTORANDO/A:

Apellidos y nombre: Vivas Fernández, Francisco José	NIF/Pasaporte: [REDACTED]	Nacionalidad: [REDACTED]
Dirección a efectos de notificaciones: Huelva	[REDACTED]	
Teléfono: [REDACTED]	EMAIL [REDACTED]	

## DATOS DE LA TESIS DOCTORAL:

Título: Contribuciones a las micro redes basadas en fuentes de energía renovable con hidrógeno como sistema de respaldo. Sistema de gestión de energía: diseño, modelado e implementación física a partir de la teoría de Modelo de Control Predictivo	
Programa Oficial de Doctorado al que se adscribe: CIENCIA Y TECNOLOGÍA INDUSTRIAL Y AMBIENTAL	
Departamento: Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática	
Director/es:	
Dr./Dra.: José Manuel Andújar Márquez	ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-0631-0021">https://orcid.org/0000-0002-0631-0021</a>
Dr./Dra.: Francisca Segura Manzano	ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-9969-8773">https://orcid.org/0000-0002-9969-8773</a>
Dr./Dra.:	ORCID:

Resumen en **castellano** que será usado para la base de datos del Ministerio TESEO (**máx. 4000 caracteres**)

Atendiendo al concepto de Smart Grid (Red Inteligente), estos sistemas están íntimamente relacionados con el uso de los sistemas de generación renovable. A pesar de los beneficios de esta tecnología, su dependencia de los recursos ambientales hace imposible garantizar el balance de energía entre generación y demanda en todo momento. Para ello, la hibridación de sistemas, así como el uso de sistemas basados en hidrógeno, se muestra como una solución técnica viable para resolver o mitigar los problemas asociados a este tipo de tecnologías. El empleo de este tipo de sistemas híbridos plantea una mayor complejidad en materia de gestión debido a la elevada cantidad de parámetros y factores a tener en cuenta de cara a garantizar un óptimo reparto energético en función de la aplicación y el estado energético del sistema.

En este sentido, han de considerarse ciertos aspectos asociados a la operación real de los sistemas, tales como la topología del sistema, costes de operación y mantenimiento, la necesidad de un control de tensión de carga para baterías, la degradación de los equipos, la dinámica de cada sistema, las pérdidas asociadas al punto de trabajo, o parámetros relacionados con la calidad del suministro eléctrico. A tenor de lo anterior, es necesario el empleo de estrategias de gestión de la energía que permitan determinar el reparto energético entre dispositivos, con el objetivo de optimizar la respuesta del sistema desde el punto de vista técnico y económico, planteándose por lo tanto un problema de optimización multiobjetivo.

Para dar respuesta al problema de optimización multiobjetivo propuesto, en la presente Tesis, se hace uso de una arquitectura de control distribuida, compuesta en un primer nivel por controladores locales, y en el nivel superior, se propone el uso de un controlador supervisor basado en técnicas de control predictivo (MPC). La función principal del controlador propuesto es determinar la consigna de operación de cada uno de los equipos que componen la Smart Grid, dando respuesta a la función objetivo propuesta de acuerdo a los criterios de diseño del sistema.

Las ventajas de la utilización de técnicas de control predictivo respecto a otro tipo de técnicas son claras; permite el empleo de técnicas de control multivariable, permitiendo plantear problemas de optimización multiobjetivo con restricciones; así como implementar una estrategia de control basado en un horizonte de predicción, lo que permite al sistema adaptar la respuesta del controlador en base a acontecimientos futuros, mejorando la respuesta del sistema frente a técnicas de control meramente pasivas.

Como base de conocimientos del controlador propuesto, en esta tesis se presenta un modelo lineal discreto generalista de la planta, calculado en cada periodo de muestreo, en base a una linealización recursiva, lo que permite aumentar la calidad del modelo respecto a soluciones basadas en torno a un único punto de linealización.

El modelo incluye todos los parámetros necesarios para el control de una planta real, incluyendo los términos asociados al estado energético del sistema, tensión de operación de baterías, así como los parámetros técnicos y económicos, tales como degradación, pérdidas o coste de operación, con el objetivo de definir una función

de coste del sistema que permita su generalidad para cualquier tipo de aplicación u objetivo de diseño.

Atendiendo al diseño del controlador propuesto, y con el objetivo de garantizar la generalidad requerida en todo el proceso, en la presente tesis se propone una metodología de diseño basado en el modelo propuesto y una función de coste que incluye todos los parámetros técnicos y económicos necesarios para resolver el problema de optimización multiobjetivo propuesto, independientemente de la aplicación y topología del sistema. Esta función objetivo permite establecer un problema de tracking de acuerdo al balance de potencia instantáneo del sistema, a la vez que son considerados los parámetros técnicos y económicos asociados a la respuesta del sistema, véase degradación y rendimiento de equipos, límites y dinámica de operación, costes de operación y mantenimiento, criterios de carga de baterías, etc.

Para garantizar la generalidad del controlador propuesto, fomentando así su uso, independientemente de la aplicación y topología del sistema, en la presente tesis se propone una metodología de diseño y tuning de los parámetros del controlador, de acuerdo a la función objetivo propuesta y los criterios de diseño en materia de prioridad de uso y distribución de energía entre equipos. La propuesta metodológica está basada en las relaciones causa-efecto entre los distintos parámetros, las cuales permiten definir el comportamiento del sistema de acuerdo a la estrategia de gestión de la energía y objetivos de diseño propuestos.

De forma similar, con el objetivo de considerar la optimización a corto y largo plazo del sistema, limitada por el concepto de horizonte deslizante propio de las técnicas de control predictivo, se hace uso de técnicas de control adicionales, las cuales actúan directamente sobre el proceso de ajuste de los parámetros del controlador. En este sentido, en base a la historia del sistema, se recalculan los parámetros del controlador, en caso de que sea necesario, actuándose directamente sobre los parámetros de ponderación, de tal forma que permita adaptar la respuesta dinámica o reparto energético de acuerdo a los criterios de diseño del controlador.

Finalmente, la metodología de diseño y el controlador propuesto fueron validados sobre la micro red experimental del grupo de investigación TEP-192. Para ello, fue necesario el diseño, desarrollo e implementación de toda la electrónica de control, adquisición y electrónica de potencia para la correcta operación e integración de los equipos.

Resumen en **inglés** que será usado para la base de datos del Ministerio TESEO (**máx. 4000 caracteres**)

Attending to the concept of Smart Grid, these systems are closely related to the use of renewable generation systems. Despite the benefits of this technology, its dependence on environmental resources makes it impossible to guarantee the balance of energy between generation and demand at all times. For this, the hybridization of systems, as well as the use of hydrogen-based systems, is shown as a viable technical solution to solve or mitigate the problems associated with this type of technologies.

The use of this type of hybrid systems poses a greater complexity in terms of management due to the high number of parameters and factors to be taken into account in order to guarantee an optimal energy distribution depending on the application and the energy status of the system.

In this sense, certain aspects associated with the actual operation of the systems, such as the topology, the operating and maintenance costs, the need for a charge voltage control for batteries, the degradation of equipment, dynamics of each system, the losses associated with the working point, or parameters related to the quality of the electricity supply. In the light of the above, it is necessary to use energy management strategies to determine the energy distribution between devices, in order to optimize the response of the system from a technical and economic point of view, therefore posing a multi-objective optimization problem.

In order to respond to the proposed multiobjective optimization problem, in this Thesis, a distributed control architecture is used, composed of local controllers at the first level, and at the top level, the use of a supervisory controller based on predictive control techniques (MPC). The main function of the proposed controller is to determine the operating setpoint of each of the equipment that makes up the Smart Grid, responding to the proposed objective function according to the system design criteria.

The advantages of using predictive control techniques over other types of techniques are clear; allows the use of multivariable control techniques, allowing multiobjective optimization in constrained problems; as well as implementing a control strategy based on a prediction horizon, which allows the system to adapt the response of the controller based on future events, improving the response of the system against merely passive control techniques.

As a knowledge base of the proposed controller, this Thesis presents a general discrete linear model of the plant, calculated in each sampling period, based on a recursive linearization, which allows to increase the quality of the model with respect to solutions based on lathe to a single point of linearization.

The model includes all the necessary parameters for the control of a real plant, including the terms associated with the energy status of the system, battery operating voltage, as well as technical and economic parameters, such as degradation, losses or operating cost, with the objective of defining a system cost function that allows its generality for any type of application or design objective.

Based on the design of the proposed controller, and with the objective of guaranteeing the generality required throughout the process, in this Thesis a design methodology based on the proposed model and a cost function

that includes all the necessary technical and economic parameters are proposed to solve the proposed multiobjective optimization problem, regardless of the application and system topology. This objective function allows to establish a tracking problem according to the instantaneous power balance of the system, while the technical and economic parameters associated with the system response are considered, see equipment degradation and performance, limits and operating dynamics, operation and maintenance costs, battery charging criteria, etc.

To guarantee the generality of the proposed controller, thus promoting its use, regardless of the application and topology of the system, this Thesis proposes a design and tuning methodology of the controller parameters, according to the proposed objective function and the design criteria in terms of priority of use and energy distribution. The methodological proposal is based on the cause-effect relationships between the different parameters, which allow defining the behavior of the system according to the energy management strategy and proposed design objectives.

Similarly, in order to consider the short and long-term optimization of the system, limited by the concept of the sliding horizon typical of predictive control techniques, additional control techniques are used, which act directly on the process of adjustment of the parameters of the controller. In this sense, based on the history of the system, the parameters of the controller are recalculated, if necessary, acting directly on the weighting parameters, in such a way that it allows adapting the dynamic response or energy distribution according to the controller design criteria.

Finally, the design methodology and the proposed controller were validated on the experimental micro grid of the TEP-192 research group. For this, it was necessary to design, develop and implement all the control, acquisition and power electronics for the correct operation and integration of the equipment.

Palabras claves en **castellano** que deben coincidir con las enviadas a la base de datos TESEO (**máx. 5 descriptores o palabras claves, separadas por coma**)

Energías renovables, Estrategia de gestión de la energía, Micro redes inteligentes, Control predictivo, Optimización técnico-económica, Hidrógeno como vector energético

Palabras claves en **inglés** que deben coincidir con las enviadas a la base de datos TESEO (**máx. 5 descriptores o palabras claves, separadas por coma**)

Renewable energy sources, Energy Management Strategy, Smart grids, Model Predictive Controller, Technical and economical optimization, Hydrogen as energy vector

**¿TESIS POR COMPENDIO DE PUBLICACIONES?**      **SI**      **NO** (tachar lo que no proceda)

Algunas publicaciones, por respeto a los posibles conflictos de propiedad intelectual relativos a su difusión, serán sustituidas por referencia, resumen y DOI o enlace al artículo.

Relación de artículos que confirman la tesis:

### **Artículo 1**

Título: A review of Energy Management Strategies for Renewable Hybrid Energy Systems with Hydrogen Backup  
Autores: F. J. Vivas, A. de las Heras, F. Segura, J. M. Andújar

Revista: Renewable and Sustainable Energy Reviews

Referencia: Vol. 81, Part 1, pp. 126-155

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.014>

Año: 2018

Número de citas recibidas: 58

Indicios de calidad: Revista incluida en el JCR, posición 7/103 en la categoría "Energy & Fuels", IF (2018): 10,556

### **Justificación de la aportación científica**

El presente trabajo estudia y analiza todos los aspectos relacionados con el diseño, análisis e implementación de micro redes basadas en energías renovables e hidrógeno como vector energético.

Para permitir identificar los principales parámetros técnicos y económicos, así como restricciones en el funcionamiento de los equipos, en este artículo se analizan las principales particularidades asociadas a cada una de las topologías, configuraciones y principales tecnologías que componen este tipo de sistemas. En este sentido, el artículo no presenta una mera revisión, sino que estudia tecnología a tecnología los principales criterios en

materia de operación, identificando los puntos de mejora y planteando soluciones técnico-económicas para reducir el impacto negativo asociado a degradación, rendimiento o coste de operación. Fruto del presente análisis, el lector puede conocer los principales agentes causantes de pérdidas de rendimiento, reducción de vida útil de equipos y aumento de costes, así como implementar soluciones particulares para resolver o mitigar el efecto asociado a cada uno de los problemas.

Para fomentar el empleo de este tipo de sistemas, es necesario no solo garantizar la viabilidad técnica, sino la optimización en la gestión de equipos y gestión de la energía dentro de la micro red. Esto plantea nuevas líneas de trabajo en materia de optimización multiobjetivo, las cuales deben dar respuesta a los principales retos en materia de degradación de equipos, coste de operación, vida útil del sistema, etc.

Finalmente, en este artículo no sólo se hace una revisión, sino que también incluye una clasificación y análisis crítico posterior de las principales aportaciones científicas en materia de estrategias de gestión de la energía. Estas estrategias pueden clasificarse en función de su objetivo principal, topología, algoritmo de control, etc. De nuevo, el artículo no presenta una mera revisión bibliográfica, sino que presenta y analiza cada una de las estrategias, identificando los principales problemas o carencias en materia de gestión técnico-económica, así como proponiendo soluciones particulares y generales en función de la categoría a estudio.

Como resultado, a partir del entendimiento del concepto de micro red, se dejan definidas las diferentes topologías y configuraciones que actualmente son utilizadas, todos aquellos problemas y soluciones asociadas a la operación de cada uno de sus equipos constituyentes, así como las principales líneas de investigación y soluciones adoptadas en materia de gestión de energía en micro redes basadas en fuentes de energía no renovable. Por tanto, el artículo ofrece el conocimiento crítico para valorar e identificar las fortalezas y debilidades de los sistemas de energía basados en fuentes renovables, pudiendo identificar nuevos nichos de trabajo.

Por último, recalcar que la presente aportación científica viene avalada por la aceptación en una de las revistas con mayor reconocimiento e índice de impacto dentro de la categoría "Energy & Fuels", posición 7/103, alcanzando un total de 57 citaciones desde su publicación en 2018.

Título: H2RES2 simulator. A new solution for hydrogen hybridization with renewable energy sources-based system

Autores: F. J. Vivas, A. de las Heras, F. Segura, J. M. Andújar

Revista: International Journal of Hydrogen Energy

Referencia: Vol. 42, Issue 19, pp. 13510-13531

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.139>

Año: 2017

Número de citas recibidas: 8

Indicios de calidad: Revista incluida en el JCR, posición 24/97 en la categoría "Energy & Fuels", IF (2017): 3,58

Título: Cell Voltage Monitoring All-in-One. A new low cost solution to perform degradation analysis on Air-Cooled Polymer Electrolyte Fuel Cells

Autores: F. J. Vivas, A. de las Heras, F. Segura, J. M. Andújar

Revista: International Journal of Hydrogen Energy

Referencia: Vol. 44, Issue 25, pp. 12842-12856

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.172>

Año: 2018

Número de citas recibidas: 2

Indicios de calidad: Revista incluida en el JCR, posición 31/103 en la categoría "Energy & Fuels", IF (2018): 4,084

Título: A suitable space-state model for renewable sources-based microgrids with hydrogen as backup for the design of energy management systems

Autores: F. J. Vivas, J. J. Caparrós, F. Segura, J. M. Andújar

Revista: IEEE Accesss

Referencia: \* En revisión

Indicios de calidad: Revista incluida en el JCR, posición 52/265 en la categoría "Engineering, electrical & electronic", IF (2018): 4,098

Título: General MPC controller to develop energy management systems in renewable sources-based smart micro grids with hydrogen as backup. Theoretical foundation and case study

Autores: F. J. Vivas, J. J. Caparrós, F. Segura, J. M. Andújar

Revista: Applied Energy

Referencia: \* En revisión

Indicios de calidad: Revista incluida en el JCR, posición 8/103 en la categoría "Energy & Fuels", IF (2018): 8,426

En Huelva, a 22 de Noviembre de 2019

Firma del interesado



Fdo. Francisco José Vivas Fernández