

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Optimización energética de sistema híbrido con bomba de calor, suelo radiante, fotovoltaica y almacenamiento para vivienda

Trabajo de Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

Luis D. Aranda Sánchez

Director: Javier Rodríguez Martín

Septiembre 6, 2024

RESUMEN

Se optimiza conjuntamente el control y dimensionamiento de un sistema energético para una vivienda equipada con bomba de calor, paneles fotovoltaicos, y almacenamiento en forma de baterías y tanque de agua.

La optimización basada en gradientes explora el uso de derivadas adjuntas para el sistema de ecuaciones diferenciales algebraicas que describen el sistema térmico. Además, se implementa la simulación y optimización conjunta mediante el método SAND (Simultaneous ANalysis and Design), también conocido como "todo a la vez"(all-at-once).

La demanda eléctrica se basa en un perfil de consumo real extraído de una vivienda existente, mientras que el consumo de calor se estima para una vivienda localizada en Madrid con calefacción de suelo radiante.

Para un año completo, se obtienen las señales de control de los equipos y los tamaños óptimos de los componentes (potencia de la bomba de calor, potencia instalada de paneles solares, potencia máxima contratada con la comercializadora, capacidad de la batería y volumen del tanque de agua) que minimizan el coste total, manteniendo simultáneamente la temperatura de la vivienda estable y cercana a los 20 °C.

Se analizan tres escenarios:

- Vivienda bajo la modalidad de autoconsumo con compensación simplificada, donde el término variable en la factura de la electricidad no puede ser negativo, limitando así la compensación económica por el excedente de electricidad volcada a la red.
- Vivienda conectada a la red, vendiendo excedentes de energía al precio de mercado.
- Vivienda off-grid (desconectada de la red eléctrica).

Palabras clave: optimización, derivadas adjuntas, diferenciación automática, control óptimo, eficiencia energética, pyoptspase.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	2
1. Introducción	4
2. Objetivos	9
3. Metodología	10
3.1. Optimización basada en gradientes con restricciones	10
3.1.1. Optimización con y sin gradientes	10
3.1.2. Restricciones	11
4. Resultados y Discusión	12
4.1. Simulación del sistema termico	12
4.2. Optimización control sistema termico con derivadas adjuntas	12
4.3. Optimización control sistema termico con SAND	12
4.4. Ecuaciones sistema electrico	12
4.5. Optimización SAND del control del sistema completo	12
4.6. Optimización SAND del control y dimensionamiento del sistema completo	12
4.6.1. Autoconsumo con compensación simplificada	12
4.6.2. Sistema off-grid	12
4.6.3. Libre venta de electricidad a precio de mercado	12
4.7. Valoración de impactos	12
5. Conclusiones	13
6. Planificación Temporal y Presupuesto	14
Bibliografía	15

1. INTRODUCCIÓN

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur felis velit, pretium ac pretium et, vestibulum nec ante. Pellentesque dictum neque et nisl facilisis, in tristique leo tempus. Aliquam imperdiet eros quis mi aliquet, sed tincidunt mauris mattis. Vivamus varius tempor sollicitudin. Duis est felis, suscipit a vehicula sed, suscipit in purus. Morbi et rhoncus mi, sed dictum est. Mauris a dui vitae sapien viverra efficitur. Morbi sed justo placerat, congue nibh placerat, suscipit ligula. Nulla congue elit at aliquet sagittis. Donec tempor cursus mi eu lacinia. Curabitur et sem ut purus pulvinar pretium. Donec at purus tempus, vestibulum augue nec, porta mauris. Praesent eget fringilla nunc.

Vivamus magna tellus, lobortis eu nisi ac, commodo fringilla nisi. Donec tortor ante, tempor non ex a, consectetur vehicula lacus. Suspendisse consequat ut urna non varius. Mauris mollis risus ac felis feugiat mattis. Sed porttitor dapibus sem, at volutpat dolor porta in. Duis diam erat, imperdiet at tortor eu, suscipit hendrerit dolor. Donec porta, libero ut condimentum hendrerit, augue diam pharetra purus, nec consequat tellus sapien in est. Etiam malesuada elementum varius. Pellentesque cursus leo enim, eu iaculis neque pellentesque non. Fusce rhoncus, ligula in rhoncus consequat, dui eros ultrices ex, nec pharetra diam ex ac tellus. Aenean suscipit nisi vel scelerisque convallis. Suspendisse tincidunt metus volutpat, condimentum tortor ut, feugiat magna. Pellentesque urna elit, congue a feugiat et, bibendum eu neque. Integer nec fringilla purus. Nunc mollis tellus placerat, convallis urna sit amet, mollis mauris. Aliquam luctus tortor vitae quam venenatis, vitae porttitor arcu viverra.

Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Cras mattis porta maximus. Donec eu nunc metus. Praesent convallis, ligula id ultricies sagittis, augue dolor tincidunt metus, sit amet laoreet quam urna et nisl. Phasellus blandit ut lectus ultricies suscipit. In hendrerit in tortor nec mollis. Praesent id tellus a magna luctus iaculis et eu urna. Suspendisse rutrum vel velit vitae convallis.

Maecenas sit amet maximus mauris, nec viverra quam. Sed condimentum nisi quis lacus mattis venenatis. Aenean lobortis erat vitae ante imperdiet convallis efficitur eu lectus. Vivamus a pretium nibh, ac pulvinar ex. Nulla gravida porttitor posuere. Ut elementum, mi eu finibus dignissim, purus sapien fermentum sapien, eu luctus arcu eros sit amet felis. Donec vitae vehicula massa, sed tempor tellus.

Sed sodales, purus id pulvinar gravida, nibh ligula elementum lectus, id condimentum massa lectus non velit. Nullam lobortis tincidunt felis vitae luctus. Ut id elit est. Nulla facilisi. Donec vitae velit blandit, ullamcorper tellus et, placerat turpis. Proin venenatis, nunc at interdum accumsan, nulla tortor consequat tortor, laoreet luctus sem leo vel diam. Duis eget leo dignissim, maximus metus commodo, mollis lorem. Maecenas hendrerit, sapien in malesuada dictum, lacus dolor mollis lorem, sed dignissim tellus mauris sit amet sapien. Duis placerat, nisi sed tincidunt imperdiet, lorem mauris rhoncus ex, at ullamcorper lacus massa sed tortor. Sed dapibus purus sed fringilla ullamcorper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur felis velit, pretium ac pretium et, vestibulum nec ante. Pellentesque dictum neque et nisl facilisis, in tristique leo tempus. Aliquam imperdiet eros quis mi aliquet, sed tincidunt mauris mattis. Vivamus varius tempor sollicitudin. Duis est felis, suscipit a vehicula sed, suscipit in purus. Morbi et rhoncus mi, sed dictum est. Mauris a dui vitae sapien viverra efficitur. Morbi sed justo placerat, congue nibh placerat, suscipit ligula. Nulla congue elit at aliquet sagittis. Donec tempor cursus mi eu lacinia. Curabitur et sem ut purus pulvinar pretium. Donec at purus tempus, vestibulum augue nec, porta mauris. Praesent eget fringilla nunc.

Vivamus magna tellus, lobortis eu nisi ac, commodo fringilla nisi. Donec tortor ante, tempor non ex a, consectetur vehicula lacus. Suspendisse consequat ut urna non varius. Mauris mollis risus ac felis feugiat mattis. Sed porttitor dapibus sem, at volutpat dolor porta in. Duis diam erat, imperdiet at tortor eu, suscipit hendrerit dolor. Donec porta, libero ut condimentum hendrerit, augue diam pharetra purus, nec consequat tellus sapien in est. Etiam malesuada elementum varius. Pellentesque cursus leo enim, eu iaculis neque pellentesque non. Fusce rhoncus, ligula in rhoncus consequat, dui eros ultrices ex, nec pharetra diam ex ac tellus. Aenean suscipit nisi vel scelerisque convallis. Suspendisse tincidunt metus volutpat, condimentum tortor ut, feugiat magna. Pellentesque urna elit, congue a feugiat et, bibendum eu neque. Integer nec fringilla purus. Nunc mollis tellus placerat, convallis urna sit amet, mollis mauris. Aliquam luctus tortor vitae quam venenatis, vitae porttitor arcu viverra.

Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Cras mattis porta maximus. Donec eu nunc metus. Praesent convallis, ligula id ultricies sagittis, augue dolor tincidunt metus, sit amet laoreet quam urna et nisl. Phasellus blandit ut lectus ultricies suscipit. In hendrerit in tortor nec mollis. Praesent id tellus a magna luctus iaculis et eu urna. Suspendisse rutrum vel velit vitae convallis.

Maecenas sit amet maximus mauris, nec viverra quam. Sed condimentum nisi quis lacus mattis venenatis. Aenean lobortis erat vitae ante imperdiet convallis efficitur eu lectus. Vivamus a pretium nibh, ac pulvinar ex. Nulla gravida porttitor posuere. Ut elementum, mi eu finibus dignissim, purus sapien fermentum sapien, eu luctus arcu eros sit amet felis. Donec vitae vehicula massa, sed tempor tellus.

Sed sodales, purus id pulvinar gravida, nibh ligula elementum lectus, id condimentum massa lectus non velit. Nullam lobortis tincidunt felis vitae luctus. Ut id elit est. Nulla facilisi. Donec vitae velit blandit, ullamcorper tellus et, placerat turpis. Proin venenatis, nunc at interdum accumsan, nulla tortor consequat tortor, laoreet luctus sem leo vel diam. Duis eget leo dignissim, maximus metus commodo, mollis lorem. Maecenas hendrerit, sapien in malesuada dictum, lacus dolor mollis lorem, sed dignissim tellus mauris sit amet sapien. Duis placerat, nisi sed tincidunt imperdiet, lorem mauris rhoncus ex, at ullamcorper lacus massa sed tortor. Sed dapibus purus sed fringilla ullamcorper.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur felis velit, pretium ac pretium et, vestibulum nec ante. Pellentesque dictum neque et nisl facilisis, in tristique leo tempus. Aliquam imperdiet eros quis mi aliquet, sed tincidunt mauris mattis. Vivamus varius tempor sollicitudin. Duis est felis, suscipit a vehicula sed, suscipit in purus. Morbi et rhoncus mi, sed dictum est. Mauris a dui vitae sapien viverra efficitur. Morbi sed justo placerat, congue nibh placerat, suscipit ligula. Nulla congue elit at aliquet sagittis. Donec tempor cursus mi eu lacinia. Curabitur et sem ut purus pulvinar pretium. Donec at purus tempus, vestibulum augue nec, porta mauris. Praesent eget fringilla nunc.

Vivamus magna tellus, lobortis eu nisi ac, commodo fringilla nisi. Donec tortor ante, tempor non ex a, consectetur vehicula lacus. Suspendisse consequat ut urna non varius. Mauris mollis risus ac felis feugiat mattis. Sed porttitor dapibus sem, at volutpat dolor porta in. Duis diam erat, imperdiet at tortor eu, suscipit hendrerit dolor. Donec porta, libero ut condimentum hendrerit, augue diam pharetra purus, nec consequat tellus sapien in est. Etiam malesuada elementum varius. Pellentesque cursus leo enim, eu iaculis neque pellentesque non. Fusce rhoncus, ligula in rhoncus consequat, dui eros ultrices ex, nec pharetra diam ex ac tellus. Aenean suscipit nisi vel scelerisque convallis. Suspendisse tincidunt metus volutpat, condimentum tortor ut, feugiat magna. Pellentesque urna elit, congue a feugiat et, bibendum eu neque. Integer nec fringilla purus. Nunc mollis tellus placerat, convallis urna sit amet, mollis mauris. Aliquam luctus tortor vitae quam venenatis, vitae porttitor arcu viverra.

Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Cras mattis porta maximus. Donec eu nunc metus. Praesent convallis, ligula id ultricies sagittis, augue dolor tincidunt metus, sit amet laoreet quam urna et nisl. Phasellus blandit ut lectus ultricies suscipit. In hendrerit in tortor nec mollis. Praesent id tellus a magna luctus iaculis et eu urna. Suspendisse rutrum vel velit vitae convallis.

Maecenas sit amet maximus mauris, nec viverra quam. Sed condimentum nisi quis lacus mattis venenatis. Aenean lobortis erat vitae ante imperdiet convallis efficitur eu lectus. Vivamus a pretium nibh, ac pulvinar ex. Nulla gravida porttitor posuere. Ut elementum, mi eu finibus dignissim, purus sapien fermentum sapien, eu luctus arcu eros sit amet felis. Donec vitae vehicula massa, sed tempor tellus.

Sed sodales, purus id pulvinar gravida, nibh ligula elementum lectus, id condimentum massa lectus non velit. Nullam lobortis tincidunt felis vitae luctus. Ut id elit est. Nulla facilisi. Donec vitae velit blandit, ullamcorper tellus et, placerat turpis. Proin venenatis, nunc at interdum accumsan, nulla tortor consequat tortor, laoreet luctus sem leo vel diam. Duis eget leo dignissim, maximus metus commodo, mollis lorem. Maecenas hendrerit, sapien in malesuada dictum, lacus dolor mollis lorem, sed dignissim tellus mauris sit amet sapien. Duis placerat, nisi sed tincidunt imperdiet, lorem mauris rhoncus ex, at ullamcorper lacus massa sed tortor. Sed dapibus purus sed fringilla ullamcorper. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Curabitur felis velit, pretium ac pretium et, vestibulum nec ante. Pellentesque dictum neque et nisl facilisis, in tristique leo tempus. Aliquam imperdiet eros quis mi aliquet, sed tincidunt mauris mattis. Vivamus varius tempor sollicitudin. Duis est felis, suscipit a vehicula sed, suscipit in purus. Morbi et rhoncus mi, sed dictum est. Mauris a dui vitae sapien viverra efficitur. Morbi sed justo placerat, congue nibh placerat, suscipit ligula. Nulla congue elit at aliquet sagittis. Donec tempor cursus mi eu lacinia. Curabitur et sem ut purus pulvinar pretium. Donec at purus tempus, vestibulum augue nec, porta mauris. Praesent eget fringilla nunc.

Vivamus magna tellus, lobortis eu nisi ac, commodo fringilla nisi. Donec tortor ante, tempor non ex a, consectetur vehicula lacus. Suspendisse consequat ut urna non varius. Mauris mollis risus ac felis feugiat mattis. Sed porttitor dapibus sem, at volutpat dolor porta in. Duis diam erat, imperdiet at tortor eu, suscipit hendrerit dolor. Donec porta, libero ut condimentum hendrerit, augue diam pharetra purus, nec consequat tellus sapien in est. Etiam malesuada elementum varius. Pellentesque cursus leo enim, eu iaculis neque pellentesque non. Fusce rhoncus, ligula in rhoncus consequat, dui eros ultrices ex, nec pharetra diam ex ac tellus. Aenean suscipit nisi vel scelerisque convallis. Suspendisse tincidunt metus volutpat, condimentum tortor ut, feugiat magna. Pellentesque urna elit, congue a feugiat et, bibendum eu neque. Integer nec fringilla purus. Nunc mollis tellus placerat, convallis urna sit amet, mollis mauris. Aliquam luctus tortor vitae quam venenatis, vitae porttitor arcu viverra.

Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per conubia nostra, per inceptos himenaeos. Cras mattis porta maximus. Donec eu nunc metus. Praesent convallis, ligula id ultricies sagittis, augue dolor tincidunt metus, sit amet laoreet quam urna et nisl. Phasellus blandit ut lectus ultricies suscipit. In hendrerit in tortor nec mollis. Praesent id tellus a magna luctus iaculis et eu urna. Suspendisse rutrum vel velit vitae convallis.

Maecenas sit amet maximus mauris, nec viverra quam. Sed condimentum nisi quis lacus mattis venenatis. Aenean lobortis erat vitae ante imperdiet convallis efficitur eu lectus. Vivamus a pretium nibh, ac pulvinar ex. Nulla gravida porttitor posuere. Ut elementum, mi eu finibus dignissim, purus sapien fermentum sapien, eu luctus arcu eros sit amet felis. Donec vitae vehicula massa, sed tempor tellus.

Sed sodales, purus id pulvinar gravida, nibh ligula elementum lectus, id condimentum mas-

sa lectus non velit. Nullam lobortis tincidunt felis vitae luctus. Ut id elit est. Nulla facilisi. Donec vitae velit blandit, ullamcorper tellus et, placerat turpis. Proin venenatis, nunc at interdum accumsan, nulla tortor consequat tortor, laoreet luctus sem leo vel diam. Duis eget leo dignissim, maximus metus commodo, mollis lorem. Maecenas hendrerit, sapien in malesuada dictum, lacus dolor mollis lorem, sed dignissim tellus mauris sit amet sapien. Duis placerat, nisi sed tincidunt imperdiet, lorem mauris rhoncus ex, at ullamcorper lacus massa sed tortor. Sed dapibus purus sed fringilla ullamcorper.

2. OBJETIVOS

3. METODOLOGÍA

3.1. Optimización basada en gradientes con restricciones

3.1.1. Optimización con y sin gradientes

La optimización paramétrica sin el uso de gradientes no es escalable para problemas con un gran número de variables de diseño, como ocurre en problemas de control óptimo, optimización topológica, o aprendizaje automático.

Los algoritmos libres de gradiente buscan el óptimo poblando el espacio de diseño y evaluando la función objetivo en estos puntos. Sin embargo, al introducir más variables de diseño, el espacio crece exponencialmente, así como el número de puntos a evaluar.

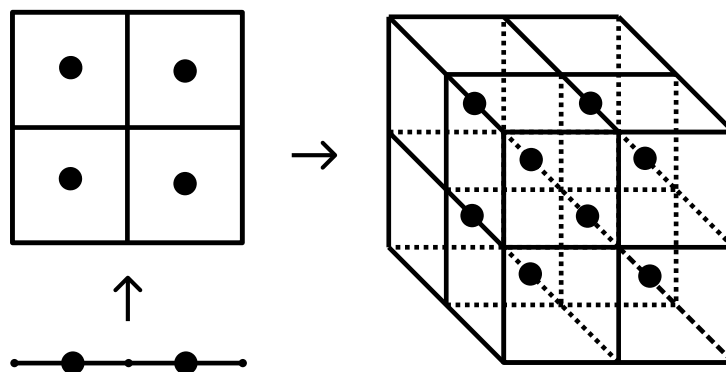


Figura 3.1: Crecimiento exponencial del número de puntos a poblar con el número de dimensiones.

Asumiendo que la evaluación de cada punto tiene un coste computacional no despreciable, el uso de estos algoritmos se vuelve inviable para problemas con más de unas pocas decenas de variables de diseño. El volumen de un hipercubo n -dimensional crece como:

$$V = l^n \quad (3.1)$$

donde l es la longitud del lado y n es la dimensión.

Los algoritmos basados en gradientes, en lugar de poblar el espacio de diseño, lo navegan avanzando hacia el óptimo por un camino determinado por el gradiente de la función objetivo

respecto a las variables de diseño.

Mientras que el espacio de diseño crece exponencialmente en volumen con el incremento de las variables de diseño, la distancia entre dos puntos dentro de este volumen no lo hace de manera tan drástica. Para un hipercubo n -dimensional, su diagonal viene dada por:

$$d = l\sqrt{n} \quad (3.2)$$

Nótese que el aumento no es exponencial con el número de dimensiones, ni tan siquiera es lineal.

Si el número de iteraciones realizadas por el algoritmo de optimización es proporcional a la longitud del camino entre los puntos inicial y final(óptimo), entonces el coste computacional crece con la raíz del número de dimensiones, o variables de diseño.

Esta estrategia permite la optimización de problemas con un gran número de incógnitas. Por ejemplo, el modelo de lenguaje Llama-3.1-405b de Meta utiliza 405 mil millones de variables [1], o parámetros como se conocen en el contexto del aprendizaje automático.

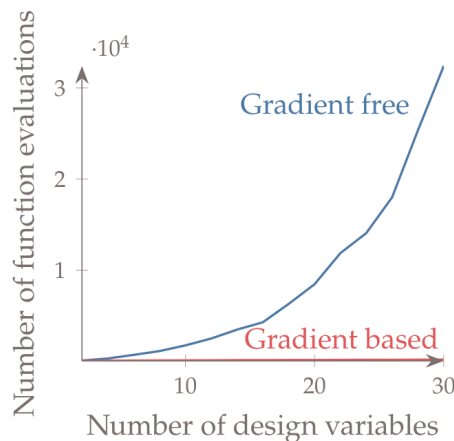


Figura 3.2: Los algoritmos de optimización que emplean gradientes escalan mucho mejor con el número de variables de diseño. (Adaptado de Martins y Ning [2], p. 22)

3.1.2. Restricciones

La gran mayoría de los problemas en ingeniería requieren el uso de restricciones en su formulación. Estas restricciones pueden ser de igualdad o desigualdad y representan limitaciones físicas, económicas o de diseño que deben satisfacerse durante el proceso de optimización.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Simulacion del sistema termico

4.2. Optimizacion control sistema termico con derivadas adjuntas

4.3. Optimizacion control sistema termico con SAND

aqui vemos que SAND es superior a MDF, en caso de ser viable su uso, y por tanto a partir de ahora estudiamos solo el uso de SAND

4.4. Ecuaciones sistema electrico

4.5. Optimizacion SAND del control del sistema completo

4.6. Optimizacion SAND del control y dimensionamiento del sistema completo

4.6.1. Autoconsumo con compensación simplificada

- 10 dias - 30 dias - 365 dias
- dimensionamiento con media ponderada no es realista suponer que tenemos conocimiento perfecto de precios futuros. realmente tendríamos que optimizar nuestro sistema con nuestra estimacion de precios, como con una red neural, aunque en este trabajo no se cubre este caso.

4.6.2. Sistema off-grid

4.6.3. Libre venta de electricidad a precio de mercado

4.7. Valoracion de impactos

5. CONCLUSIONES

6. PLANIFICACIÓN TEMPORAL Y PRESUPUESTO

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abhimanyu Dubey et al. "The Llama 3 Herd of Models". En: *arXiv preprint arXiv:2407.21783* (2024).
- [2] Joaquim R. R. A. Martins y Andrew Ning. *Engineering Design Optimization*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, ene. de 2022. ISBN: 9781108833417. DOI: [10.1017/9781108980647](https://doi.org/10.1017/9781108980647). URL: <https://mdobook.github.io>.