
Propuesta de Trabajo de Investigación: Optimización Simheurística para la Flexibilidad Energética Considerando Variables Estocásticas en Sistemas Renovables

Anonymous Author(s)

Affiliation

Address

email

Abstract

1 Este proyecto propone el estudio de un modelo de optimización simheurística para
2 la planificación de la gestión energética en sistemas con generación renovable y al-
3 macenamiento, considerando la incertidumbre inherente en los modelos predictivos
4 de generación, demanda y precios del mercado. El algoritmo combinará búsqueda
5 heurística *Branch & Bound* con metaheurísticas de búsqueda local y aleatorización
6 sesgada, integrando la simulación de diferentes escenarios mediante técnicas Monte
7 Carlo. El objetivo es minimizar costes operativos y reducir riesgos en un horizonte
8 de 48 horas, equilibrando calidad de solución y viabilidad computacional. El
9 algoritmo se validará con un conjunto de datos sintético basado en parámetros de
10 diferentes sectores industriales y se comparará frente a enfoques deterministas,
11 empleando técnicas bayesianas para un análisis estadístico robusto. Se espera que
12 los resultados proporcionen estrategias más eficientes en la gestión energética en
13 sectores con alta penetración renovable, reduciendo los costes de operación y el
14 impacto ambiental. Este proyecto se desarrollará en el marco de un programa de
15 doctorado, relacionado con la optimización de la flexibilidad energética.

16 1 Introducción

17 En los últimos años se han logrado avances en la generación de energía eléctrica renovable, en
18 particular eólica y solar, y en el almacenamiento energético mediante baterías, aumentando la
19 eficiencia de estos sistemas. La combinación de ambas tecnologías, unida a la fluctuación de los
20 precios en el mercado diario, ofrece oportunidades para incrementar la flexibilidad energética que
21 resultan especialmente relevantes en industrias con altos consumos de electricidad. Una planificación
22 optimizada de la gestión de la producción y el almacenamiento puede servir para determinar los
23 momentos óptimos de compra y vertido a red, mejorando el rendimiento económico, la estabilidad de
24 los sistemas y además reducir el impacto ambiental.

25 Sin embargo, la incertidumbre inherente en la predicción de la generación renovable, en la demanda
26 y la variabilidad en los precios pueden afectar significativamente a dicha planificación y a los
27 rendimientos obtenidos, sobre todo a largo plazo. Los enfoques tradicionales de programación
28 determinista no permiten modelar adecuadamente el carácter estocástico de dichas estimaciones,
29 lo que puede derivar en soluciones subóptimas o económicamente inviables si finalmente se dan
30 condiciones adversas, no tenidas en cuenta por los modelos predictivos. Por lo tanto, resulta necesario
31 aplicar otras metodologías que incorporen dicha variabilidad, de modo que las planificaciones

32 recomendadas proporcionen tanto una minimización de los costes como una reducción de los riesgos
33 en situaciones desfavorables.

34 En este proyecto de investigación se propone un enfoque de optimización simheurística, combinando
35 métodos de simulación para evaluar diferentes escenarios posibles con algoritmos de optimización,
36 que establecerán una planificación robusta ante diferentes situaciones en un horizonte temporal
37 de 48 horas. El objetivo es mejorar la toma de decisiones al considerar la aleatoriedad de las
38 variables involucradas debida a los errores de estimación de los modelos predictivos. El algoritmo
39 propuesto combinará metodologías de ramificación y poda (*Branch & Bound*) con optimización
40 metaheurística para la búsqueda local. Además, se aplicarán técnicas de aleatorización sesgada
41 (*biased randomization*), para mejorar la exploración del espacio heurístico. La simulación de
42 escenarios mediante técnicas Monte Carlo (MC) permitirá estimar los costes esperados bajo diferentes
43 desviaciones en los pronósticos. Se espera que la combinación de estas técnicas proporcione una
44 exploración más diversa de soluciones factibles, permitiendo minimizar los costes de operación y, a
45 su vez, mejorar la robustez de la estrategia de gestión energética.

46 2 Motivación

47 Los enfoques simheurísticos y de optimización estocástica han sido ampliamente estudiados en
48 sectores como la logística y la salud [1, 2], pero su aplicación en flexibilidad energética sigue siendo
49 limitada en la literatura actual. Dado el crecimiento de las energías renovables y el impacto de la
50 incertidumbre en su gestión, la integración de estos métodos en la planificación energética representa
51 una oportunidad de investigación con un alto potencial de impacto, tanto desde una perspectiva
52 industrial como ambiental.

53 Desde un punto de vista práctico, la planificación energética debe equilibrar la optimización de costes
54 con la capacidad de reacción ante condiciones adversas. Por otro lado, el tiempo de cómputo no debe
55 ser excesivo para ser aplicable en entornos de operación reales. Por tanto, la solución proporcionada
56 debe ofrecer un compromiso entre el tiempo de cómputo, la calidad de las soluciones y la reducción
57 del riesgo ante situaciones desfavorables [3].

58 Para mejorar la eficiencia computacional, este estudio explorará estrategias avanzadas de poda y
59 heurísticas que permitan una exploración inteligente del espacio de búsqueda [4]. En particular, se
60 evaluarán tres estrategias:

- 61 • Aleatorización sesgada (*biased randomization*) para diversificar la exploración y evitar
62 estancamientos en óptimos locales [5].
- 63 • Eliminación de ramas con baja probabilidad de contener soluciones óptimas basándose en
64 análisis estadístico de Monte Carlo [6].
- 65 • Poda de ramas con alto riesgo de escenarios desfavorables, priorizando soluciones con
66 mayor estabilidad frente a otros más imprevisibles [7].

67 Para garantizar la aplicabilidad en entornos reales, se desarrollará un conjunto de datos sintético
68 basado en parámetros industriales, tomando como referencia informes institucionales y auditorías
69 energéticas realizadas por expertos. El rendimiento del algoritmo propuesto se comparará frente a
70 enfoques deterministas y exclusivamente heurísticos o metaheurísticos.

71 3 Hipótesis

72 Este estudio se basa en la premisa de que la incorporación de la incertidumbre en la optimización de
73 la programación energética mejorará la eficiencia en costes y reducirá la variabilidad de los resultados,
74 especialmente cuando se considere su aplicación en el largo plazo. Las hipótesis principales son las
75 siguientes:

- 76 1. La incorporación explícita de la incertidumbre en las decisiones de planificación mejora la
77 eficiencia en costes a largo plazo, ya que permite una mejor evaluación de los riesgos [8].
- 78 2. Un enfoque híbrido que combine *Branch & Bound* con metaheurísticas de búsqueda local
79 mejora la calidad de las soluciones frente a modelos exclusivamente heurísticos o meta-
80 heurísticos, al aprovechar poda estructurada y una exploración más eficiente. Se espera que

81 esta aproximación proporcione mejor equilibrio entre el tiempo de cómputo y las soluciones
82 alcanzadas [3, 9].

83 3. La inclusión de técnicas de aleatorización sesgada y evaluación de escenarios mediante
84 Monte Carlo garantizará la robustez de la planificación bajo condiciones finales inciertas,
85 sin comprometer la viabilidad computacional [1, 4].

86 4 Objetivos

87 El objetivo de esta investigación es obtener una planificación óptima de la operación de sistemas
88 fotovoltaico-eólicos con almacenamiento en un horizonte de 48 horas, minimizando los costes de
89 operación y a su vez siendo robustos ante situaciones adversas. Para ello se desarrollará y evaluará
90 un enfoque de optimización simheurística que integre *Branch & Bound* con metaheurísticas de
91 búsqueda local para la planificación, incorporando la aleatoriedad en la predicción de la generación,
92 los precios de mercado y la demanda. La granularidad de estas variables será horaria, dado que se
93 considera suficiente para reflejar los cambios en las diferentes variables y es ampliamente utilizado
94 en aplicaciones similares. Para alcanzar este objetivo, el estudio busca:

- 95 • Formular y diseñar un modelo de optimización simheurístico que integre poda estructurada
96 y búsqueda local para mejorar la eficiencia en la programación.
- 97 • Explorar y evaluar estrategias de poda basadas en análisis estadístico de posibles soluciones,
98 considerando tanto la poca probabilidad de escenarios óptimos como el riesgo de situaciones
99 extremadamente desfavorables.
- 100 • Simular la variabilidad de las condiciones mediante técnicas Monte Carlo, de modo que se
101 consiga realizar una evaluación adecuada de las distintas situaciones sin que ello suponga
102 un aumento significativo en los tiempos de cómputo.
- 103 • Desarrollar un conjunto de datos sintético que represente errores de pronóstico en generación,
104 demanda y precios de mercado.
- 105 • Aplicar técnicas de evaluación bayesiana para comparar de forma robusta el rendimiento del
106 modelo propuesto con enfoques deterministas y modelos estocásticos donde no se combine
107 búsqueda heurística con metaheurísticos.

108 5 Metodología

109 El primer paso de la investigación es la formulación del problema, definiendo el modelo matemático
110 para la programación de un sistema fotovoltaico-eólico con almacenamiento, incluyendo restricciones
111 de balance energético, operación del almacenamiento y participación en el mercado. También el
112 diseño de la función objetivo, que debe minimizar los costes operativos totales, integrando costes
113 de compra de energía, degradación del almacenamiento o penalizaciones por incumplimiento de la
114 demanda.

115 A continuación, para garantizar la aplicabilidad del estudio, se generará un conjunto de datos sintético
116 que refleje relaciones de parámetros reales en entornos industriales en España. Este conjunto de datos
117 se diseñará con base en estudios previos actualmente en fase de aceptación.

118 Posteriormente se desarrollará el modelo de optimización simheurístico, integrando búsqueda discreta
119 basada en *Branch & Bound* y aleatorización sesgada con métodos metaheurísticos para refinar la
120 búsqueda local en el dominio continuo. La selección de los modelos metaheurísticos se realizará
121 en base a la literatura, escogiendo aquellos reportados como especialmente eficientes en la fase
122 de explotación en años recientes. Por otro lado, la simulación de escenarios posibles se realizará
123 mediante técnicas *MC*.

124 A pesar de los beneficios esperados, el algoritmo enfrenta ciertos desafíos. La precisión de las
125 simulaciones dependerá de la correcta calibración de los escenarios, lo que podría afectar la validez
126 de los resultados si los datos de entrada no reflejan con fidelidad la incertidumbre real. Además,
127 la combinación de simulación y optimización puede generar costos computacionales elevados en
128 problemas de gran escala, lo que requerirá un equilibrio entre la exploración del espacio de búsqueda
129 y la viabilidad computacional.

130 Una vez desarrollado el algoritmo, se procederá a su evaluación comparativa con modelos alternativos,
131 incluyendo enfoques deterministas, heurísticos y metaheurísticos puros. Se analizará el desempeño
132 del modelo propuesto en términos de calidad de solución, tiempo de cómputo y reducción de riesgos.
133 En particular, se comparará el impacto de las estrategias de poda y simulación en la eficiencia
134 computacional y la robustez de la planificación energética.

135 Finalmente, se realizarán experimentos computacionales para evaluar el desempeño de los modelos
136 bajo distintos escenarios, cuantificando su eficiencia mediante técnicas bayesianas. Esta fase garan-
137 tizará que las estrategias propuestas sean aplicables en entornos industriales reales y proporcionen
138 soluciones óptimas en términos de coste y resiliencia operativa.

139 6 Conclusión

140 Esta investigación propone un modelo de optimización simheurística para la programación energética
141 flexible bajo incertidumbre, combinando *Branch & Bound*, metaheurísticas y simulación Monte Carlo.
142 Su rendimiento se comparará con el de otros enfoques deterministas y heurísticos mediante técnicas
143 bayesianas, teniendo en cuenta la calidad de las soluciones obtenidas, la reducción de los riesgos y el
144 coste computacional. Los resultados contribuirán al desarrollo de estrategias de programación más
145 robustas en sistemas energéticos con alta penetración de renovables con almacenamiento.

146 References

- 147 [1] A. A. Juan, J. Faulin, S. E. Grasman, M. Rabe, and G. Figueira, “A review of simheuristics: Ex-
148 tending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems,” *Operations*
149 *Research Perspectives*, vol. 2, pp. 62–72, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.orp.2015.03.001.
- 150 [2] M. Schilde, K. F. Doerner, and R. F. Hartl, “Metaheuristics for the dynamic stochastic dial-a-ride
151 problem with expected return transports,” *Comput Oper Res*, vol. 38, no. 12, pp. 1719–1730, Feb.
152 2011, doi: 10.1016/j.cor.2011.02.006.
- 153 [3] M. Chica, A. A. Juan, C. Bayliss, O. Cordon, and W. D. Kelton, “Why simheuristics? Benefits,
154 limitations, and best practices when combining metaheuristics with simulation,” *SORT*, vol. 44,
155 no. 2, pp. 311–334, Feb. 2020, doi: 10.2436/20.8080.02.104.
- 156 [4] Y. Alipouri, “A Resource Flow Based Branch-and-bound Algorithm to Solve Fuzzy Stochastic
157 Resource-constrained Project Scheduling Problem,” Feb. 2021, doi: 10.21203/rs.3.rs-722470/v1.
- 158 [5] V. A. Cicirello and S. F. Smith, “Enhancing Stochastic Search Performance by Value-Biased
159 Randomization of Heuristics,” 2005.
- 160 [6] L. Lei and M. Urgo, “A branch-and-bound approach to minimise the value-at-risk of the makespan
161 in a stochastic two-machine flow shop,” *Int J Prod Res*, vol. 62, 2024.
- 162 [7] Z. Li, C. G. S. Sikora, and I. Kucukkoc, “Chance-constrained stochastic assembly line balancing
163 with branch, bound and remember algorithm,” *Ann Oper Res*, vol. 335, no. 1, pp. 491–516, Feb.
164 2024, doi: 10.1007/s10479-023-05809-1.
- 165 [8] A. A. Juan et al., “A review of the role of heuristics in stochastic optimisation: from metaheuristics
166 to learnheuristics,” *Ann Oper Res*, vol. 320, no. 2, pp. 831–861, Feb. 2023, doi: 10.1007/s10479-
167 021-04142-9.
- 168 [9] L. Bianchi, M. Dorigo, L. M. Gambardella, and W. J. Gutjahr, “A survey on metaheuristics
169 for stochastic combinatorial optimization,” *Nat Comput*, vol. 8, no. 2, pp. 239–287, 2009, doi:
170 10.1007/s11047-008-9098-4.