

HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA EL DISEÑO Y CABLEADO ÓPTIMOS DE PARQUES EÓLICOS

Fiorini, M. Josefina

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral

Director: Presser, Demian

Co-director: Cafaro, Diego

Área: Ingeniería

Palabras claves: parques eólicos, optimización, cableado.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las energías renovables constituye uno de los pilares fundamentales en el camino hacia la descarbonización y la configuración de una matriz energética sostenible. La energía eólica, en particular, ha presentado su segundo mejor año en la historia en términos de crecimiento. En 2021, la industria registró un incremento del 1,8 % en la capacidad instalada, justo por detrás del pico histórico en el año 2020. En términos absolutos, se añadieron casi 94 GW de capacidad, mostrando un claro indicador de la increíble resistencia y la trayectoria ascendente de la industria.

La producción y rentabilidad de los parques eólicos depende fuertemente de ciertas decisiones de diseño. Típicamente, el diseño de un parque eólico involucra la localización de los aerogeneradores en el terreno y la configuración de cableado para la extracción de la potencia producida. En este trabajo, se propone un abordaje riguroso del problema de diseño de parques eólicos mediante herramientas de programación matemática mixta entera lineal y se establecen importantes conclusiones respecto de la capacidad de estas técnicas.

OBJETIVOS

Este trabajo busca obtener modelos de programación matemática de carácter riguroso que sean capaces de tomar decisiones concernientes al diseño y cableado de turbinas en parques eólicos. Para ello, se propone una aproximación en donde, a partir de una disposición de aerogeneradores ya establecida, se busca determinar la configuración óptima de cableado del parque. Esto es, establecer el trazado del cableado y la localización de subestaciones de transformación que minimicen el costo total. Las soluciones de optimización que se proponen aquí complementan a otras ya desarrolladas para la localización de aerogeneradores, de modo de maximizar la potencia generada.

Título del proyecto: Desarrollo de herramientas avanzadas de optimización para el diseño de parques eólicos bajo incertidumbre anemométrica.

Instrumento: Cientibeca

Año convocatoria: 2021

Organismo financiador: Universidad Nacional del Litoral (UNL)

Director: Presser, Demian Javier

METODOLOGÍA

Definición del problema

En una primera fase de este proyecto de investigación se trabajó en la elaboración de modelos de programación matemática orientados a la localización de aerogeneradores. Estos modelos buscan establecer la disposición óptima de turbinas en el terreno, de modo de minimizar los efectos de interferencia (o estela) esperados y maximizar la potencia del parque. Sin embargo, otro factor clave del diseño de un parque es el trazado de cableado y la localización de subestaciones eléctricas.

En esta segunda fase del proyecto, se abordó el problema de cableado de parques eólicos partiendo de las soluciones obtenidas para los problemas de localización. El problema de cableado puede definirse como sigue. Dado: (a) un conjunto definido de localizaciones $i \in I$ donde se emplazan los aerogeneradores; (b) un conjunto $s \in S$ de subestaciones transformadoras de energía a instalar; (c) diferentes niveles de potencia admisible $pl \in PL$, asociados a distintos tipos de cable y subestaciones; y (d) la potencia esperada para cada turbina eólica (según diferentes escenarios de viento y relaciones de interferencia entre las mismas), se busca encontrar la mejor disposición de subestaciones y el trazado de cableado del parque que minimice el costo total del proyecto.

Formulación matemática del modelo

En este apartado se plantean las ecuaciones principales que definen la región factible y la función objetivo de la formulación mixta entera lineal (MILP) que busca minimizar los costos de tendido eléctrico en un parque eólico.

Como se mencionó en la sección anterior, se parte de un conjunto definido de localizaciones de turbinas eólicas obtenido a partir del modelo MILP de la fase 1 de este proyecto. La potencia producida esperada de cada turbina pe_i es también conocida, y se obtiene de las soluciones encontradas para el problema de localización.

Sea $xs_{i,j,pl}$ una variable binaria cuyo valor es 1 si la turbina localizada en la posición i se conecta con la subestación en el sitio j a través de un cable de tipo pl . Se define la ecuación (1) donde se indica que todo aerogenerador i puede conectarse, como mucho, con una sola subestación:

$$\sum_{pl} \sum_j xs_{i,j,pl} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (1)$$

Se denomina $pl \in PL$ a los niveles de potencia admisible, en donde se incluyen 3 niveles predefinidos (pl_1 a pl_3). El elemento pl_1 representa al mayor nivel de potencia admisible por un cable/subestación y es el componente necesario para poder extraer toda la potencia del parque que luego se inyecta a la red eléctrica. Los niveles intermedios pl_2 y pl_3 representan una menor potencia admisible y sirven de intermediarios para recolectar la potencia generada por un subgrupo de turbinas del parque. De esta forma, se definen tipos de cables y subestaciones de distintas capacidades según el elemento del conjunto pl que les corresponda. Cada subestación posee asociada, entonces, una potencia máxima admisible $pmax_{pl}$ y diferentes números de conexiones entrantes tolerables, nc_{pl} . A medida que la capacidad aumenta, una subestación puede recibir una mayor potencia.

La variable binaria $ys_{j,pl}$ adquiere valor 1 en el caso de que en la localización j se instale una subestación de tipo pl . De esta manera, la ecuación (2) plantea que, si en un dado sitio j se decide instalar una subestación, esta puede tener una única capacidad:

$$\sum_{pl} y_{s_{j,pl}} \leq 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

En la ecuación (3) se indica que el flujo de potencia enviado desde la turbina localizada en i hacia la subestación localizada en j ($FP_{i,j}$), en caso de que exista conexión, no debe superar la potencia admisible por parte de la misma:

$$FP_{i,j} \leq \sum_{pl} p_{max_{pl}} y_{s_{j,pl}} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (3)$$

La ecuación (4), por su parte, propone la relación entre la conexión establecida entre los sitios i y j ($x_{s_{i,j,pl}}$) con la decisión de establecer en j una subestación de tipo pl ($y_{s_{j,pl}}$), a través del número máximo de conexiones que es capaz de absorber una subestación de tipo pl (nc_{pl}):

$$\sum_{pl} \sum_i x_{s_{i,j,pl}} \leq \sum_{pl} nc_{pl} y_{s_{j,pl}} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

Finalmente, se establece un balance de flujos de potencia mediante la ecuación (5) en donde RT_i indica la recepción total de energía en el sitio i . De esta manera, todo el flujo que ingresa a un nodo debe ser extraído hacia otro nodo o hacia la red. Los flujos de potencia salientes de subestaciones intermedias de tipo pl_2 y pl_3 no generan beneficios, sino que conducen la potencia hacia otro nodo de nivel igual o superior:

$$RT_i = \sum_{s \neq i} FP_{s,i} + pe_i - \sum_{j \neq i} FP_{i,j} \quad \forall i \in I \quad (5)$$

La función objetivo del modelo de optimización presentado busca minimizar los desembolsos que intervienen en esta etapa del proyecto (ver (6)). Para ello, se computan costos variables (cc_{pl}) y costos fijos (ci) de cableado, y el costo de instalación de las diferentes subestaciones (sub). El parámetro $dist_{i,j}$ indica la distancia entre los sitios i y j :

$$\min z = \sum_{pl} \sum_j sub_{pl} y_{s_{j,pl}} + \sum_i \sum_j \sum_{pl} cc_{pl} dist_{i,j} x_{s_{i,j,pl}} + ci \sum_i \sum_j \sum_{pl} dist_{i,j} x_{s_{i,j,pl}} \quad (6)$$

El modelo presentado fue implementado en software GAMS 37 y resuelto mediante el resolutor GUROBI 9.5.1.

RESULTADOS

Para la validación y análisis del modelo presentado en la sección anterior, se propone un caso de estudio ilustrativo con 25 localizaciones potenciales a lo largo de un terreno de 1.68 km², donde se decidió previamente la instalación 16 aerogeneradores de tipo Vestas V80 de 2 MW de potencia máxima.

La Figura 1 muestra la solución de red de cableado obtenida para el problema considerando 3 niveles distintos de potencia admisible en cables y subestaciones. Los costos de inversión en cableado e instalaciones ascienden a los 4.05 MUSD, instalando una subestación pl_1 en el sitio i_{12} y 4 subestaciones pl_3 en los sitios i_5 , i_6 , i_9 e i_{13} . Los cables empleados son en su mayoría los de menor tamaño, salvo para las conexiones $i_9 - i_{12}$ e $i_{13} - i_{12}$ en donde la potencia transmitida (debido al agrupamiento de turbinas) requiere la utilización de cables de mayor capacidad. Cabe destacar que existen economías de escala en la selección del cableado.

