

Modelado basado en el paradigma de los energy hubs de una explotación agraria bajo invernadero con apoyo de energías renovables

J. Ramos Teodoro, F. Rodríguez Díaz y M. Berenguel Soria
Departamento de Informática, UAL, Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120, España,
Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario (ceiA3)
CIESOL Centro de Investigación en Energía Solar.

Palabras clave: sistemas multi-energía, programación lineal en enteros mixta, reparto económico, eficiencia energética.

Resumen

La gestión de recursos energéticos y materiales en sistemas productivos es un tema habitual en la literatura reciente. En este sentido, se ha desarrollado un modelo de conversión y almacenamiento de recursos heterogéneos en una explotación agraria con el fin de realizar su operación de forma eficiente. A partir del mismo es posible determinar la combinación de recursos de entrada que permiten su operación con el menor coste posible mediante la formulación de un problema de programación lineal en enteros mixta, teniendo en cuenta las características de los equipos y dispositivos del invernadero. Se ha realizado la simulación de un típico día cálido empleando una estrategia de control con horizonte deslizante, observándose en los resultados un uso intensivo de energía solar térmica y fotovoltaica.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha crecido el interés por el uso de energías renovables y el aprovechamiento eficiente de los recursos a escala local debido a que contribuyen a reducir el impacto medioambiental del ser humano. Uno de los enfoques adoptados en este ámbito es el de los energy hubs (Geidl et al., 2007), término utilizado para designar sistemas que producen, convierten y almacenan diferentes tipos de energía y recursos, sirviendo de interfaz entre productores, consumidores y la infraestructura de transporte.

Este trabajo tiene por objetivo la formulación del modelo, basado en el enfoque de los energy hubs de Geidl, para el funcionamiento eficiente de explotaciones agrarias con apoyo de energías renovables. Para ello se han de integrar los modelos de cada uno de los dispositivos que componen la explotación junto con los modelos de predicción de la radiación solar y el consumo de recursos, de manera que a partir de éstos pueda formularse un problema de programación lineal en enteros mixta (MILP) con el objetivo principal de optimizar el coste de operación de la explotación agraria.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el proyecto ENERPRO (ARM-TEP197, 2017), en el que se trabaja en el análisis, diseño y aplicación de técnicas de modelado, control y optimización para conseguir una gestión eficiente de energía, agua y CO₂, se dispone de un sistema productivo real a modo de planta demostrativa que incluye un invernadero, una desaladora solar y un parking fotovoltaico que se describen, brevemente, a continuación.

El sistema AQUASOL de la Plataforma Solar de Almería (Alarcón Padilla et al., 2006) consiste en una planta desaladora multiefecto (MED), que funciona a partir de un campo de 252 captadores de tipo concentrador parabólico compuesto (CPC Ao Sol 1.12x)

y el apoyo de una caldera ATTSU RL200 de gas propano. El invernadero del proyecto ENERPRO (Sánchez, Rodríguez, Guzmán, & Arahál, 2012) está instalado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar (El Ejido, Almería). Se trata de un invernadero tipo parral con una superficie de 877 m² cuyo sistema de calefacción está constituido por un calefactor GP 95 de propano de 95 kW y por una caldera Missouri 150 000 de hasta 174 kW que emplea biomasa. El parking fotovoltaico de la Universidad de Almería cuenta con 483 paneles CONERGY PA 264P, 24 paneles CONERGY POWER PLUS 240M y 72 paneles FIRST SOLAR FS-380, con una potencia pico total de la instalación de 1176,48 kW y una potencia nominal de 1015 kW, escalándose a su vigésima parte.

Sobre los elementos mencionados, es posible plantear un modelo global de conversión y almacenamiento (Fig. 1), basado en los sub-modelos de proceso de cada dispositivo, que se describirá brevemente. Éste incluye las salidas del energy hub, como energía eléctrica, energía térmica, agua y CO₂; y entradas como las redes hídrica y eléctrica, radiación solar, agua de mar y combustibles en forma de propano y biomasa. El objetivo es determinar, a partir del modelo global, la cantidad de cada uno de los recursos de entrada necesarios para cubrir la demanda con el menor coste posible, teniendo en cuenta únicamente los costes asociados al precio de cada recurso que imponen las compañías suministradoras. Por cuestiones de espacio y dado que escapan al alcance de esta comunicación, no se detallan los sub-modelos de proceso de cada dispositivo ni las técnicas de predicción utilizadas para determinar la demanda de recursos.

Modelo de conversión entrada-salida

Las ecuaciones 1 y 2 establecen en cada instante de tiempo (k) la relación entre el vector de salidas (\mathbf{O}), que integra a las variables correspondientes a los recursos de entrada, es decir, energía eléctrica (E_O) y energía térmica (H_{GH}) del invernadero, CO₂ (G_O), energía eléctrica (E_{DP}) y energía térmica (H_{DP}) de la desaladora y agua (W_O); el vector de entradas (\mathbf{I}), que integra a las variables correspondientes a los recursos de salida, es decir, energía eléctrica (E_I) y agua (W_I) de las redes de suministro, radiación solar fotovoltaica ($R_{PV,PK}$) y térmica ($R_{SC,DP}$), propano para la caldera (P_{DP}) y el calefactor (P_{GH}), biomasa (B_{GH}) y agua de mar (S_{DP}); y los vectores de carga (\mathbf{Q}_c) y descarga (\mathbf{Q}_d), que contienen variables con el mismo nombre que las del vector de salidas a las que se añade el subíndice c o d, respectivamente. La matriz de conversión \mathbf{C}_1 contiene los coeficientes de conversión obtenidos a partir de los sub-modelos de proceso.

$$\mathbf{O}(k) = \mathbf{C}_1(k) \cdot \mathbf{A}(k) - \mathbf{Q}_c(k) + \mathbf{Q}_d(k) \quad (1) \quad \mathbf{I}(k) = \mathbf{C}_2 \cdot \mathbf{A}(k) \quad (2)$$

Para facilitar la formulación del problema se emplea el vector de entradas auxiliar (\mathbf{A}), en el que se incluye una variable para cada una de las salidas posibles de una misma entrada, de forma que la suma de estas se corresponde con la cantidad total de recurso de la entrada, conforme a la ec. 2, por lo que \mathbf{C}_2 es una matriz de ceros y unos. Por otro lado, la disponibilidad de recursos y/o la capacidad de producción pueden estar limitadas, por lo que se establecen restricciones conforme a las ecuaciones 3 y 4 para el número total de entradas (n) y dispositivos (m). Para cada dispositivo la variable binaria δ expresa el estado encendido o apagado, por lo que las salidas correspondientes a la demanda de la desaladora dependen de su estado de funcionamiento a través de δ_{DP} . El valor de D_j para cada dispositivo se calcula como la suma de las variables de \mathbf{A} que convergen en dicho dispositivo multiplicadas por su coeficiente de conversión de \mathbf{C}_1 .

$$I_i^{\min} \delta_{i,i} \leq I_i \leq I_i^{\max} \delta_{i,i} \quad \text{con } i = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$D_j^{\min} \delta_{D,j} \leq D_j \leq D_j^{\max} \delta_{D,j} \quad \text{con } j = 1, \dots, m \quad (4)$$

Modelo de almacenamiento

La ec. 5 determina la relación entre la cantidad de recursos acumulada en los sistemas de almacenamiento (S) en un instante de tiempo y el siguiente, teniendo en cuenta la matriz de eficiencia de carga (P_c) y descarga (P_d), así como la matriz de degradación (L) de los recursos almacenados, todas ellas diagonales.

$$S(k+1) = L(k)S(k) + P_c(k)Q_c(k) - P_d(k)Q_d(k) \quad (5)$$

Además, se establecen los límites correspondientes a la velocidad de carga o descarga y a la capacidad máxima para el total de sistemas de almacenamiento (o), mediante las ec. 6, 7 y 8. Se emplean variables binarias para expresar el estado de carga o descarga, imponiendo la ec. 9 que ambos procesos no puedan ocurrir simultáneamente.

$$0 \leq Q_{c,l} \leq Q_{c,l}^{m\acute{a}x} \delta_{c,l} \quad \text{con } l = 1, \dots, o \quad (6) \quad 0 \leq S_i \leq S_i^{m\acute{a}x} \quad \text{con } l = 1, \dots, o \quad (8)$$

$$0 \leq Q_{d,l} \leq Q_{d,l}^{m\acute{a}x} \delta_{d,l} \quad \text{con } l = 1, \dots, o \quad (7) \quad \delta_{c,i} + \delta_{d,i} \leq 1 \quad \text{con } l = 1, \dots, o \quad (9)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir del modelo global propuesto, es posible plantear el problema de programación lineal en enteros mixta (MILP) con el que determinar la cantidad de recursos de entrada y el almacenamiento que se requiere en cada instante de tiempo para minimizar el coste de operación. A modo de ejemplo, se presentan los resultados para un día típico cálido (Fig. 2) cuyos perfiles de demanda se han determinado a partir del promedio de diferentes días seleccionados durante los meses de verano de 2014 a 2017. Es posible observar que se realiza un uso intensivo de la energía solar térmica y fotovoltaica, así como el aprovechamiento del agua procedente de la desaladora, debido a sus menores costes asociados frente al precio de la energía eléctrica y el agua procedente de las redes de suministro. Aunque por razones de espacio se ha reducido un caso concreto el número de pruebas realizadas, podría hacerse funcionar el modelo con conjuntos de datos reales diferentes de los empleados. Además, esta formulación del problema contempla la posibilidad de sustituir los sub-modelos de proceso empleados por otros de mayor o menor complejidad en función de la precisión en los resultados requerida y la capacidad de computación disponible.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto R+D+i del Plan Nacional DPI2014-56364-C2-1-R del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y Fondos FEDER.

Referencias

- Alarcón Padilla, D. C., Blanco Gálvez, J., Lozano, A., Malato Rodríguez, S., Maldonado Rubio, M. I., y Fernández Ibáñez, P. 2006. Experimental result of AQUASOL project: development of an advanced hybrid solar-gas multi-effect distillation system. En 13th International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies. Sevilla.
- Geidl, M., Koeppel, G., Favre-Perrod, P., Klöckl, B., Andersson, G., y Fröhlich, K. 2007. Energy Hubs for the Future. IEEE Power and Energy Magazine, 5(1), 24-30.
- Grupo de Investigación de Automática Robótica y Mecatrónica (ARM-TEP197). 2016. ENERPRO. Recuperado 21 de abril de 2017, a partir de <http://www2.ual.es/enerpro/>
- Sánchez, J. A., Rodríguez, F., Guzmán, J. L., y Arahal, M. R. 2012. Virtual sensors for designing irrigation controllers in greenhouses. Sensors (Basel, Switzerland), 12(11), 15244-66.

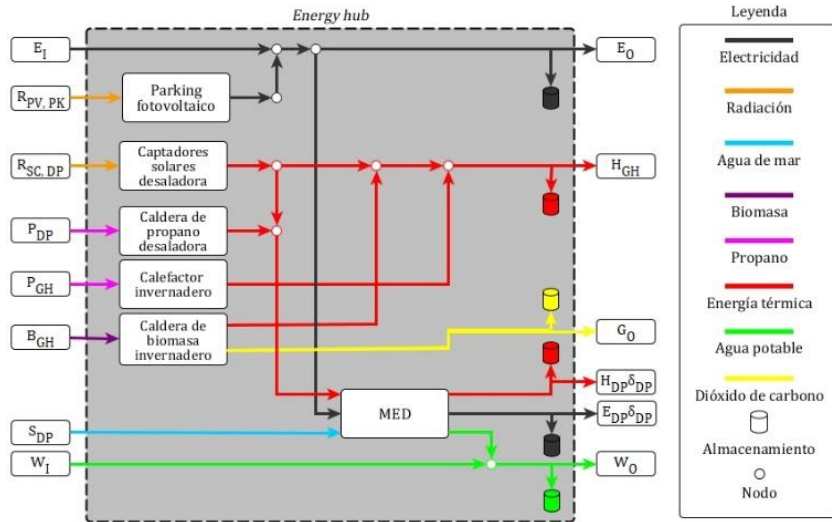


Fig. 1. Modelo energy hub propuesto para la gestión de la planta

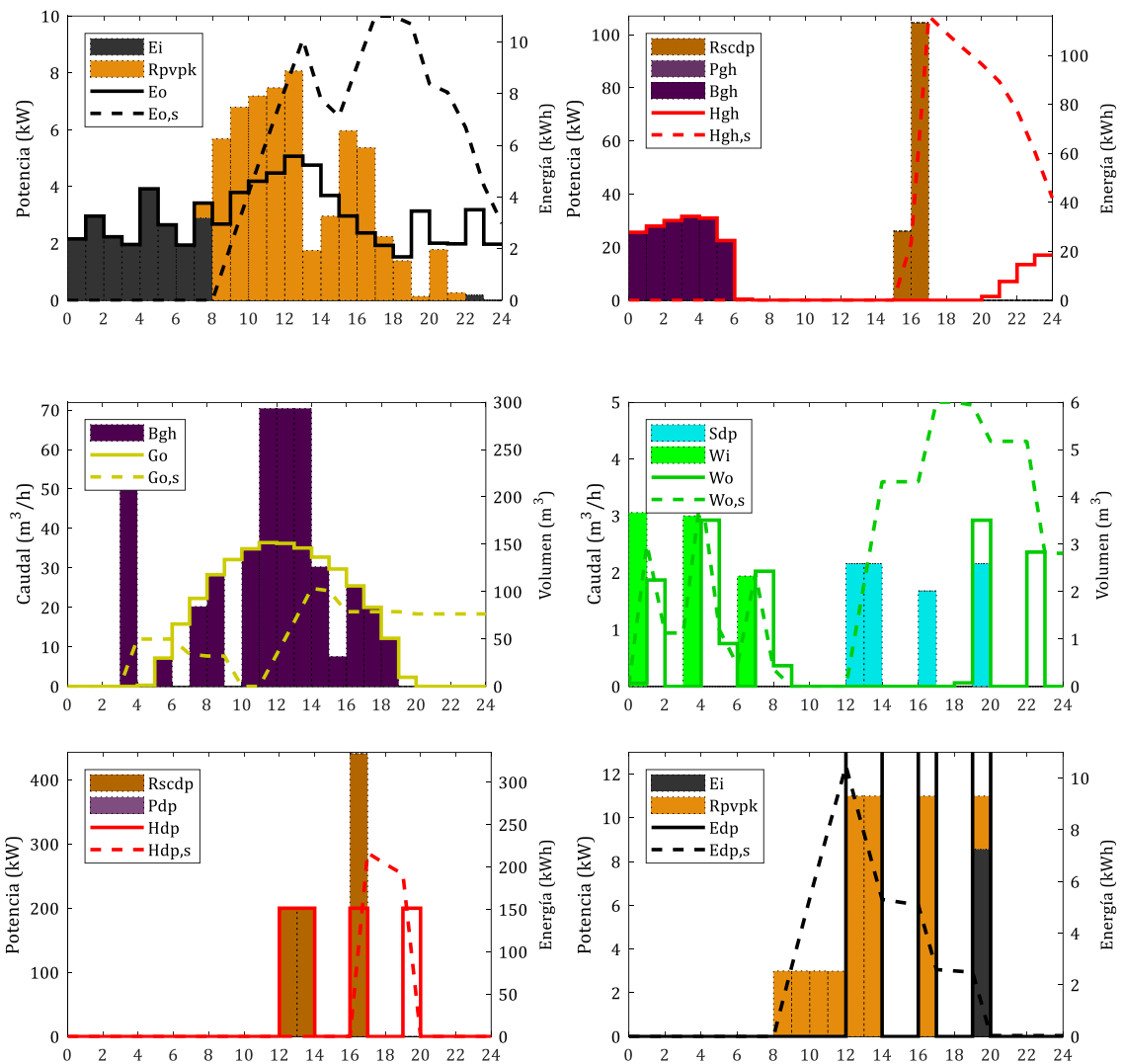


Fig. 2. Reparto de recursos de entrada (barras), demanda de recursos de salida (línea continua) y almacenamiento (línea discontinua) para un día promedio cálido