

5.3 Almacenamiento de energía a escala de servicios públicos como facilitador de la mitigación de CO₂

Apéndice C

Octubre, 2020



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



Danish Energy
Agency

Directorio

Dra. María Amparo Martínez Arroyo

Directora General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Elaboración, edición, revisión y supervisión:

Dra. Claudia Octaviano Villasana

Coordinadora General de Mitigación al Cambio Climático

Ing. Eduardo Olivares Lechuga

Director de Proyectos Estratégicos en Tecnologías de Bajo Carbono

Dr. Ing. Roberto Ulises Ruiz Saucedo

Subdirector de Innovación y Transferencia Tecnológica

Lic. Econ. Erick Rosas Lopez

Jefe de Depto. de Metodologías de Mitigación en los Sectores Energía, Transporte y Procesos Industriales

Mtro. Loui Algren

Asesor de la Agencia de Energía de Dinamarca

Dra. Amalia Pizarro Alonso

Asesora del Programa México-Dinamarca para Energía y Cambio Climático

Este reporte es parte del estudio:

Mapa de ruta tecnológica y potencial de mitigación del almacenamiento de energía a escala de servicios en México

Preparado por:

Mtro. Søren Storgaard Sørensen

Asesor de la Cooperación Global de la Agencia de Energía de Dinamarca

Dra. Amalia Pizarro Alonso

Asesora del Programa México-Dinamarca para Energía y Cambio Climático

Y Lic. Econ. Erick Rosas Lopez. INECC

Por encargo de INECC con apoyo del Programa México-Dinamarca para Energía y Cambio Climático

D.R. © 2020 Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Blvd. Adolfo Ruíz Cortines 4209,

Jardines en la Montaña, Ciudad de México. C.P. 14210

<http://www.gob.mx/inecc>



Apéndice C

El modelo de sistemas de energía Balmorel-MX

Este material complementario presenta una descripción metodológica y matemática del modelo de sistemas energéticos Balmorel [1, 2], con un enfoque en la versión para México, en adelante Balmorel-MX, utilizada para este estudio. El modelo Balmorel puede tener otras características, además de las aquí descritas, que se pueden encontrar en www.balmorel.com y en [3].

El objetivo de Balmorel es maximizar el bienestar social, lo que equivale a minimizar el costo total del sistema, al asumir demandas inelásticas y bajo el supuesto de mercados perfectamente competitivos. El modelo está escrito en el lenguaje GAMS (General Algebraic Modeling System) y el problema de optimización se resuelve con cplex. En este estudio, Balmorel-MX, se ejecuta con despacho económico simultáneo y optimización de inversiones en tecnologías energéticas para electricidad y cogeneración, incluyendo capacidades de transmisión de energía. Las principales características del modelo Balmorel-MX se resumen a continuación:

- **Balmorel es un modelo de abajo hacia arriba (bottom-up)**, ya que se centra en las tecnologías de suministro, incluida la transmisión de energía, y es independiente del comportamiento del mercado. El modelo se puede utilizar en escenarios exploratorios, para analizar lo que sucedería si ... ?, y en escenarios normativos, como para evaluar cuál es la forma más rentable de lograr un objetivo de emisión de gases de efecto invernadero deseado [4].
- **Balmorel es un modelo de equilibrio parcial**, ya que solo optimiza el suministro de energía y cogeneración (como en Balmorel-MX), ceteris paribus para lograr el equilibrio. Sin embargo, como ya señalaron Bohringer y Schmid [5], el impacto de las medidas políticas o las incertidumbres, como los cambios en los precios de los combustibles o en las curvas de aprendizaje, podrían no estar restringidos únicamente al sistema energético, y deberían analizarse dentro de un contexto económico más amplio si las interrelaciones son importantes. La ecuación que representa el equilibrio entre la oferta y la demanda del mercado único considerado, constituye el precio de compensación del mercado, tomando como precios exógenos en otros mercados, el comportamiento de los agentes, etc.
- La optimización es determinista, y la incertidumbre paramétrica de los escenarios se evalúa mediante análisis de sensibilidad local deferente, variando un factor a la vez, pero sin considerar la estocasticidad como parte de la optimización en sí. Además, debido a que no está representada la economía completa, como se mencionó anteriormente, el análisis de sensibilidad permite considerar los posibles impactos de algunos parámetros modelados como exógenos, los cuales podrían verse afectados por el sistema energético.



Balmorel-MX tiene tres capas de resolución espacial: País¹, Regiones que pertenecen a un País y Áreas que pertenecen a una Región dentro de un País. Las tecnologías de generación están ubicadas en Áreas, que representan características geográficas individuales dentro de una Región. La demanda de electricidad se establece a nivel de Región y se puede comerciar entre Regiones siempre que haya una línea para la transmisión de energía; sin embargo, el comercio de electricidad dentro de una región se modela como una placa de cobre sin representar la red eléctrica. Las restricciones de recursos y las políticas pueden establecerse en cualquier nivel geográfico deseado: país, región y / o área.

Balmorel-MX tiene tres niveles jerárquicos de dimensiones temporales. Las inversiones y los objetivos climáticos se establecen a nivel anual. El Año se divide además en Temporadas, que representan variaciones estacionales de recursos, como los niveles de los embalses de energía hidroeléctrica o la disponibilidad de biomasa después de la cosecha. Cada temporada contiene un número igual de términos, que representan la dinámica a corto plazo del sistema. En este estudio cada año se ha realizado con 12 Temporadas y 168 Términos, que equivalen a 12 semanas completas (una semana representativa por cada mes) con una resolución horaria. Las estaciones y los términos se definen cronológicamente en Balmorel-MX dentro de un año para representar el comportamiento de los niveles de los embalses hidráulicos.

Balmorel podría ejecutarse con diferentes grados de previsión entre años (¿Cuánto se puede saber o anticipar sobre el futuro?) Y dentro del año de optimización, por ejemplo, considerando el valor del agua de los embalses hidroeléctricos. En este estudio, Balmorel-MX se ejecuta:

- **Abordaje Myopico (miope)** entre años, cada año se optimiza sin ningún conocimiento sobre cómo podría evolucionar el futuro. Se eligió este método, ya que un análisis anterior mostró que las inversiones con un enfoque de previsión perfecta hasta 2050 (el último año de este estudio) y un enfoque miope eran similares; y considerando el hecho de que resolver el problema con perfecta previsión aumenta considerablemente el tiempo de cálculo.
- **Perfecta previsión** dentro del año de optimización. Los embalses hidroeléctricos tienen la capacidad de prever cómo evolucionará la generación y la demanda de electricidad a lo largo del año, con el fin de maximizar el valor del agua que almacenan. Del mismo modo, dado que el consumo de combustibles fósiles puede verse limitado por los objetivos climáticos, su uso se optimiza durante el año.
- **No se ha asumido ningún desmantelamiento endógeno de plantas**, debido a la ausencia de previsión entre años de optimización que podría derivar en decisiones subóptimas a largo plazo para acciones tomadas a corto plazo. El sacar de operación las plantas podría haberse considerado, dado el enfoque miope del ejercicio, pero se dejó fuera del alcance del presente análisis, ya que algunas de estas plantas podrían ser útiles para proporcionar servicios auxiliares, que no están modelados.

¹ El país, la región, el área, el año, la temporada y el término se escriben con mayúscula para indicar la notación Balmorel-MX específica



- El algoritmo de barrera (también conocido como método de punto interior) fue el que resolvió el problema más rápidamente con una resolución temporal menos detallada; por lo tanto, se eligió para realizar el análisis completo.

A continuación, se describe una formulación matemática simplificada del modelo Balmorel-MX. La nomenclatura de los conjuntos, parámetros y variables de las diferentes ecuaciones se puede encontrar al final del documento.

La función objetivo de Balmorel-MX, Ecuación 1, minimiza el costo de satisfacer la demanda de electricidad y la demanda de calor de proceso que potencialmente podría ser cubierta por cogeneración, en cada Año y , representada como Z_y , que incluye los costos de suministro de electricidad y calor de proceso. Incluidas las inversiones en generación y transmisión. Una representación matemática simplificada de la función objetivo es la siguiente:

Minimizar:

$$\begin{aligned}
 Z_y = & + \sum_{a \in A} \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} c_{y,a,g}^{vOP} \cdot p_{y,a,g,s,t} + \sum_{a \in A} \sum_{g \in G} c_{y,g}^{CAP} \cdot p_{y,a,g}^{new} \\
 & + \sum_{a \in A} \sum_{g \in G} c_g^{fxOP} \cdot (p_{y,a,g}^{exist} + p_{y,a,g}^{new}) + \sum_{r,r' \in \mathcal{R}^{ex}(r)} c_{r,r'}^{CAP} \cdot p_{y,r,r'}^{tr-new}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Los costos variables de operación de la tecnología g , $c_{y,a,g}^{vOP}$, representan los costos variables de operación y mantenimiento de la tecnología g , más los costos asociados al consumo de combustible y los impuestos ambientales relacionados (ej. emisiones de gas); así, cambiando y evolucionando a lo largo de los años y , y siendo específico a cada área a . Los costos variables totales son función de la variable endógena de generación de energía y/o calor de proceso a partir de la tecnología g , ubicada en el área a , en el momento $y, s; t$.

Los costos de inversión corresponden a inversiones endógenas en nueva capacidad de generación, $p_{y,a,g}^{new}$ nueva al inicio del año y , y los costos de capital incurridos, $c_{y,g}^{CAP}$, que son función del año y , ya que considera curvas de aprendizaje exógenas. Estos últimos se anualizan utilizando un factor de anualización que es función de la tasa de descuento y la vida económica de la tecnología g . De igual forma, los costos de inversión para la expansión endógena de líneas de transmisión de energía entre las regiones r y r' , $p_{y,r,r'}^{tr-new}$, se calculan con un valor anualizado de los costos de inversión para esa línea. $c_{r,r'}^{CAP}$.

Los costos operacionales fijos consideran la capacidad instalada total exógena, $p_{y,a,g}^{exist}$, existente, y endógena $p_{y,a,g}^{new}$ nueva, de la tecnología g en el área a al inicio del año y y los gastos operativos fijos c_g^{fxOP} asociados.

La optimización está sujeta a limitaciones, como el equilibrio de la oferta y la demanda de electricidad en cada período de tiempo, limitaciones técnicas, limitaciones de disponibilidad de recursos y limitaciones regulatorias, entre otras [3]. Algunas de las restricciones utilizadas en Balmorel-MX se ilustran a continuación.

La ecuación 2 asegura que la demanda de electricidad, $d_{y,r,s,t}^{el}$, se satisface en todas las regiones (las áreas geográficas a se agregan en regiones de transmisión r) y períodos de tiempo. La electricidad puede transmitirse entre regiones, donde la variable $p_{y,r,r',s,t}^{trans}$ muestra la cantidad de electricidad exportada de la región $r \in \mathcal{R}$ a la región $r' \in \mathcal{R}^{exp}(r)$, y la variable $p_{y,r,r',s,t}^{trans}$ denota la cantidad de electricidad importada, incluidas las pérdidas, desde la región $r' \in \mathcal{R}^{exp}(r)$ hacia r durante el período de tiempo s, t .

$$\sum_{a \in \mathcal{A}(r)} \sum_{g \in \mathcal{G}} p_{y,a,g,s,t}^{el} + \sum_{r' \in \mathcal{R}^{im}(r)} e_{r',r} \cdot p_{y,r',r,s,t}^{trans} - \sum_{r' \in \mathcal{R}^{ex}(r)} p_{y,r,r',s,t}^{trans} = d_{y,r,s,t}^{el}$$

$$\forall y \in \mathcal{Y}, r \in \mathcal{R}, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}$$
(2)

De manera similar, la Ecuación 3 representa que toda la demanda de calor del proceso que potencialmente podría ser cubierta por las calderas de cogeneración o solo de calor, $d_{a,s,t}^{dh}$, se satisface en todas las áreas y períodos de tiempo.

$$\sum_{g \in \mathcal{G}} p_{y,a,g,s,t}^{ph} = d_{y,a,s,t}^{ph} \quad \forall y \in \mathcal{Y}, a \in \mathcal{A}, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}$$
(3)

La ecuación 4 representa la restricción del flujo de un bien, $p_{y,a,g,s,t}$, en cada período de tiempo y, s, t , dada por la capacidad instalada de una tecnología despachable g en el área a , que como se mencionó anteriormente toma en cuenta la capacidad exógena y endógena, y la disponibilidad de la planta. Este producto básico es el suministro de electricidad para plantas de energía y tecnologías de cogeneración, y el calentamiento de procesos para calderas de solo calor.

$$p_{y,a,g,s,t} \leq k_{y,a,g,s,t}^D \cdot (p_{y,a,g}^{exist} + p_{y,a,g}^{new}) \quad \forall y \in \mathcal{Y}, a \in \mathcal{A}, g \in \mathcal{G}^D, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}$$
(4)



Cuando la planta g no es despachable (eólica, solar e hidráulica de pasada), la generación se fija en cada momento específico s ; t y área a , pero es posible recortar (curtail) su producción, en caso de que sea óptimo para el sistema.

$$p_{y,a,g,s,t} + p_{y,a,g,s,t}^{curt} = k_{y,a,g,s,t}^{ND} \cdot (p_{y,a,g}^{exist} + p_{y,a,g}^{new}) \quad \forall \quad y \in \mathcal{Y}, a \in \mathcal{A}, g \in \mathcal{G}^{ND}, s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T} \quad (5)$$

La ecuación 6 describe los límites de la transmisión de energía entre las regiones interconectadas r ; r' dada por la capacidad exógena, $p_{y,r,r'}^{tr-exist}$, y endógena, $p_{y,r,r'}^{tr-new}$, de las líneas y su disponibilidad.

$$p_{y,r,r',s,t}^{trans} \leq k_{y,r,r',s,t}^{trans} \cdot (p_{y,r,r'}^{tr-exist} + p_{y,r,r'}^{tr-new}) \quad \forall \quad y \in \mathcal{Y}, r \in \mathcal{R}, r' \in \mathcal{R}^{ex}(r), s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T} \quad (6)$$

Las limitaciones a las emisiones de gases de efecto invernadero se calculan en función del combustible consumido en el país para una actividad específica y el potencial de calentamiento global de ese combustible. Sin embargo, cabe señalar que muy a menudo solo se ejecutan intervalos de tiempo seleccionados dentro de un año; por lo tanto, a cada segmento de tiempo se le debe dar un peso relativo dentro del año para evaluar las restricciones anuales.

$$GHG_y^{Cap} \geq \sum_{a \in \mathcal{A}} \sum_{f \in \mathcal{F}} GW_f \sum_{g \in \mathcal{G}(f)} p_{y,a,g,s,t}^{fuel} \quad \forall \quad y \in \mathcal{Y} \quad (7)$$

Disponibilidad de recursos, almacenamiento de agua en reservorios hidroeléctricos, así como restricciones operativas, p. Ej. relacionados con la operación de plantas combinadas de calor y energía, no se describen en las ecuaciones anteriores; sin embargo, todas son limitaciones de la optimización en Balmorel-MX, que se pueden consultar en las referencias proporcionadas.



Nomenclatura

Conjuntos	
\mathcal{A}	Áreas
$\mathcal{A}(r)$	Subconjunto de áreas en una región $r \in R$
\mathcal{F}	Combustibles
\mathcal{G}	Tecnologías
\mathcal{G}^D	Subconjunto de tecnologías que son despachables
\mathcal{G}^{DN}	Subconjunto de tecnologías que no son despachables
$\mathcal{G}(f)$	Subconjunto de tecnologías que consume el combustible f
\mathcal{R}	Regiones
$\mathcal{R}^{exp}(r)$	Subconjunto de regiones a las cuales la región $r \in R$ puede exportar
$\mathcal{R}^{imp}(r)$	Subconjunto de regiones de las cuales la región $r \in R$ puede importar
\mathcal{S}	Estaciones
\mathcal{T}	Periodos de tiempo en una estación
\mathcal{Y}	Años
VARIABLES	
$p_{y,a,g}^{new}$	Inversiones endógenas en tecnología g en el área a en el año y
$p_{y,r,r'}^{tr-new}$	Inversiones en transmisión de potencia entre región r y r' en el año y
$p_{y,r,r',s,t}^{trans}$	Trasmisión de electricidad entre región r and región r' en el periodo de tiempo s, t en el año y
$p_{y,a,g,s,t}$	Nivel de mercancía en el área a de la tecnología g en el periodo de tiempo s, t en el año y
$p_{y,a,g,s,t}^{curt}$	Recorte (curtailment) de la tecnología g en el periodo de tiempo s, t en el año y
$p_{y,a,g,s,t}^{fuel}$	Consumo de combustible de la tecnología g en el área a en el periodo de tiempo s, t en el año y
Z_y	Costo total del Sistema para satisfacer la demanda de energía en el año y
PARAMETROS	
$c_{y,g}^{CAP}$	Costos de inversión anualizados de la tecnología g en el año y
$c_y^{fx OP}$	Costos fijos de operación de la tecnología g
$c_y^{v OP}$	Costos variables de operación de la tecnología g en el año y
$d_{y,g}^{ph}$	Demanda de calor de proceso que puede ser suministrada por cogeneración en el área a en el periodo de tiempo s, t en el año y
$d_{y,r,s,t}^{el}$	Demanda de electricidad en la región r en el periodo de tiempo s, t en el año y
$e_{r',r}$	Eficiencia de la transmisión de potencia entre regiones r' y r
GHG_y^{cap}	Límite de emisión de Gases de Efecto Invernadero en el año y
GW_f	Factor de Potencial de Calentamiento Global del combustible f
$k_{y,r,s,t}^D$	Disponibilidad de la tecnología g despachable, localizada en el área a en el periodo de tiempo s, t en el año y
$k_{y,a,g,s,t}^{ND}$	Disponibilidad de la tecnología g no-despachable, localizada en el área a en el periodo de tiempo s, t en el año y
$k_{y,r,r',s,t}^{trans}$	Disponibilidad de la línea de transmisión entre las regiones r y r' , en el periodo de tiempo s, t en el año y
$p_{y,a,g}^{exist}$	Capacidad existente de la tecnología g en el área a en el año y



Referencias

- [1] Hans Ravn. The Balmorel Model: Theoretical Background. <http://balmorel.com/images/downloads/The-Balmorel-Model-Theoretical-Background.pdf>, 2001. (accessed 30 January 2018).
- [2] Hans Ravn. The Balmorel Model Structure version 3.03. <http://balmorel.com/images/downloads/model/BMS303-20160907.pdf>, 2016. (accessed 30 January 2018).
- [3] Frauke Wiese, Rasmus Bramstoft, Hardi Koduvere, Amalia Pizarro Alonso, Olexandr Balyk, Jon Gustav Kirkerud, Åsa Grytli Tveten, Torjus Folsland Bolkesjø, Marie Münster, and Hans Ravn. Balmorel open source energy system model. *Energy Strategy Reviews*, 20:26-34, 2018.
- [4] CW Frei, PA Haldi, and G Sarlos. Dynamic formulation of a top-down and bottom-up merging energy policy model. *Energy Policy*, 31(10):1017-1031, 2003.
- [5] C Bohringer. The synthesis of bottom-up and top-down in energy policy modeling. *Energy Economics*, 20(3):233-248, 1998.