

FAMILIA DE MODELOS MARKAL-TIMES

TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) es un generador de modelos desarrollado como parte del Programa de Análisis de Sistemas de Tecnologías Energéticas de la agencia Internacional de Energía (IAE-ETSAP Energy Technology Systems Analysis Programme). TIMES, así como su predecesor MARKAL, se desarrolló como herramienta para estudiar los impactos de las políticas energéticas en el largo plazo. Este es un modelo de optimización en el que se minimiza el costo económico de satisfacer las demandas de energía útil cumpliendo con las restricciones ingresadas durante el modelamiento del sistema energético. Esta minimización se hace a partir de la caracterización de las disponibilidades de recursos energéticos primarios, de infraestructura y de las demandas de servicios energéticos. Los resultados obtenidos son, entre otros, la conformación de la canasta energética de mínimo costo el periodo de análisis, los precios sombra de los recursos y la trayectoria de emisión de gases contaminantes asociados con el sistema energético (Berger, Dubois, Haurie, Lessard, Loulou, 1991; Fishbone, Abilock, 1981; Goldstein, Hill, 1991; ETSAP, 2004).

El modelo se construye a partir de la definición de diferentes bloques que representan las etapas de la cadena energética. Estas etapas van desde la obtención de los energéticos primarios hasta los usos finales de la energía. En la Figura 1. se presenta un diagrama de bloques de la estructura de un sistema energético modelado en TIMES. Los recursos energéticos primarios se obtienen a partir de la minería y la extracción de las reservas modeladas para la región en estudio. Los recursos energéticos secundarios provienen de las tecnologías de conversión (energéticos no almacenables como la electricidad o el calor) o de tecnologías de proceso (por ejemplo, los derivados de petróleo). Por otro lado, tanto los energéticos primarios como secundarios pueden ser exportados o importados hacia o desde el mercado internacional. Las tecnologías de demanda son los equipos que transforman los energéticos en usos finales tales como cocción, iluminación o unidades de transporte. Las demandas por energía útil se ingresan exógenamente y son una restricción a ser satisfecha.

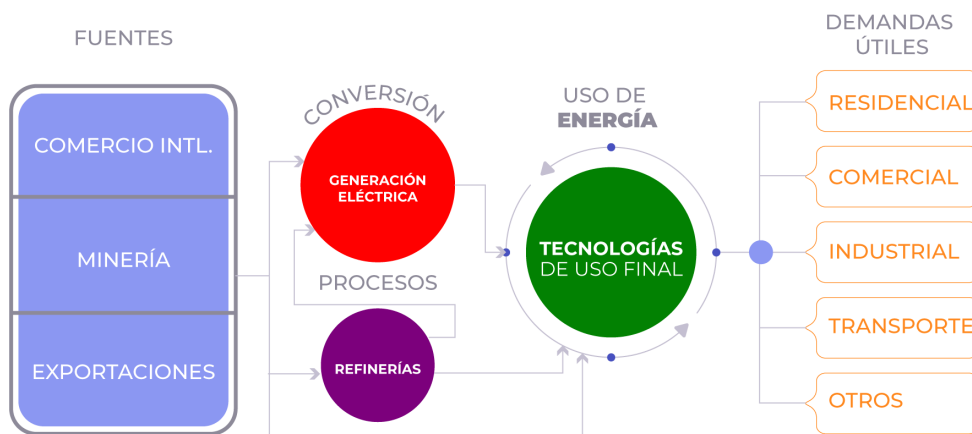


Figura 1. Diagrama de bloques de un sistema energético modelado en TIMES.

A la elaboración de los bloques de cada uno de los procesos de la cadena energética y la asociación de las tecnologías y recursos disponibles se le llama Sistema Energético de Referencia (RES por sus siglas en inglés). La estructura modular de TIMES, permite que se realicen mejoras al sistema de referencia reemplazando algunos bloques por otros más elaborados, o implementando nuevos bloques para representar procesos que no se habían tenido en cuenta anteriormente. El proceso de modelamiento en TIMES es un proceso continuo y los niveles de detalle del modelamiento dependen del tipo de preguntas a ser contestadas o de los escenarios futuros a ser explorados.

1.1 Formulación matemática

El problema de optimización planteado por el modelo TIMES es el siguiente:

$$\min c^t x$$

Minimizar el costo total del sistema energético (x es el vector de niveles de actividad energética y c es el vector de costos unitarios de las actividades). Sujeto a las siguientes restricciones:

$$Ax \leq b$$

Los recursos utilizados deben ser inferiores a la cantidad dotada inicialmente (A es la matriz de coeficientes técnicos de las actividades y b es el vector de dotación inicial de recursos).

$$Dx \leq d$$

Las demandas ingresadas deben ser satisfechas en su totalidad (D es la matriz de coeficientes técnicos de producción de energía por actividad y d es el vector de demandas de energía útil a satisfacer).

$$Ex \leq e$$

Las emisiones generadas por el sistema energético deben ser inferiores al límite establecido (E es la matriz de coeficientes de emisión de contaminantes por actividad y e es el vector de límites de emisión admitidos). En este caso si bien las emisiones fueron contabilizadas, no se estableció ninguna restricción.

Finalmente se tiene la restricción de no negatividad y no nulidad del vector de niveles de actividad energética.

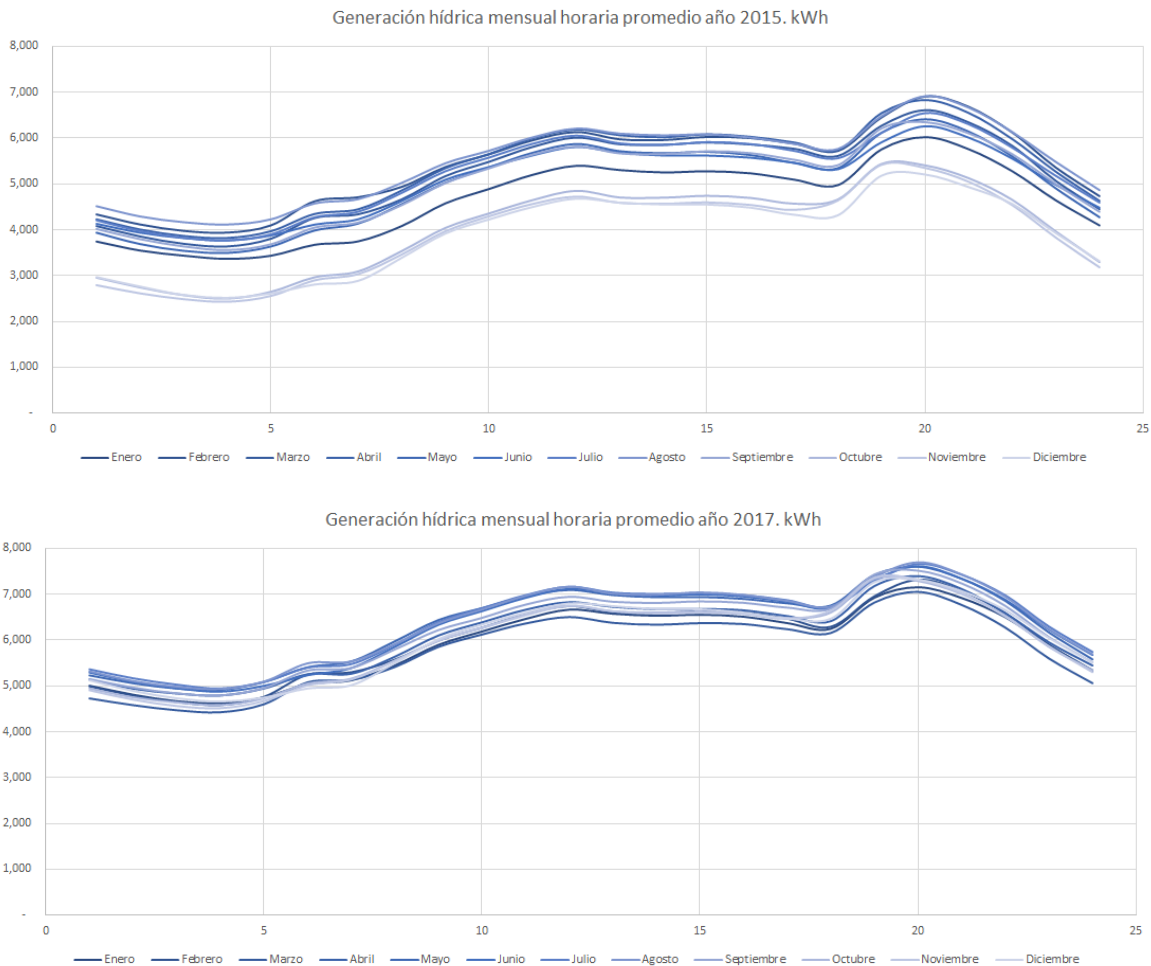
2 EL MODELO TIMES-COL

El modelo TIMES-COL es la continuación del trabajo de modelaje desarrollado en Colombia durante más de dos décadas. El predecesor del modelo TIMES-COL es el modelo Markal Colombia, desarrollado en la década de los 90 en el marco de la tesis doctoral de Ángela Cadena. El modelo se mantuvo activo y fue utilizado en diferentes estudios de prospectiva energética y en varias tesis de pregrado y de maestría. La migración hacia el modelo TIMES en Colombia inició como parte del trabajo doctoral de Ricardo Delgado en la Universidad de los Andes. El CREE ha dado continuidad a estos desarrollos y ha construido el modelo TIMES-COL con el objetivo de conformar un ecosistema de herramientas de modelaje alrededor de este. A continuación, se presentan las características generales de TIMES-COL.

2.1 Resolución temporal

En el modelo base, el periodo de análisis es 2015-2050, teniendo a los años 2015 y 2018 como años de calibración. TIMES es flexible tanto en la extensión del horizonte de estudio como en la división temporal de ese horizonte. Así, TIMES-COL puede reportar resultados para periodos de duración homogénea o aumentar la resolución en periodos de tiempo que sean de particular interés.

La Figura 2. Presenta los perfiles de generación hidroeléctrica mensual en los años 2015 y 2017. Como puede observarse, hay diferencias en las generaciones entre los meses del año y entre los diferentes años. Para poder capturar esas diferencias y sus impactos sobre el



sistema energético, cada año de estudio se subdivide en cuatro periodos determinados por el comportamiento histórico de la generación hídrica en Colombia. Esos periodos estacionales van los dos hasta los cinco meses de duración.

Figura 2. Generación hídrica mensual promedio en Colombia en el año 2015 (arriba) y 2017 (abajo) en kWh. Elaboración propia con datos de XM.

En la Figura 3. se puede observar que los niveles de consumo de electricidad varían según el día de la semana y la hora del día. De esta manera, en TIMES-COL, cada periodo estacional está dividido en perfiles semanales lo que permite modelar las diferencias en los consumos de

electricidad entre los días laborales, sábados y domingos. Finalmente, cada uno de esos perfiles semanales está dividido en cinco bloques horarios para tener una aproximación linealizada de la curva diaria de demanda eléctrica típica y de las variaciones intradiarias en la oferta de electricidad a partir de energías renovables intermitentes.

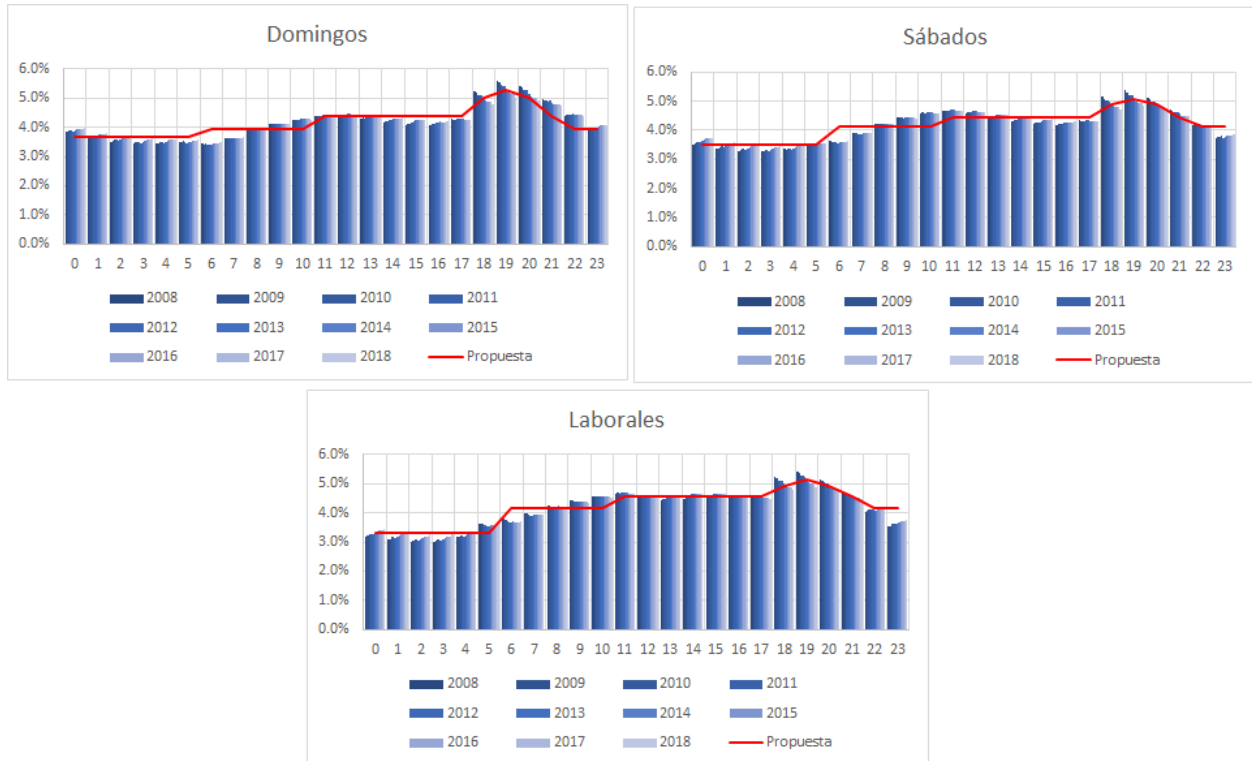


Figura 3. Consumo de electricidad por tipo de día como porcentaje de la demanda anual total en Colombia. Elaboración propia con datos de XM.

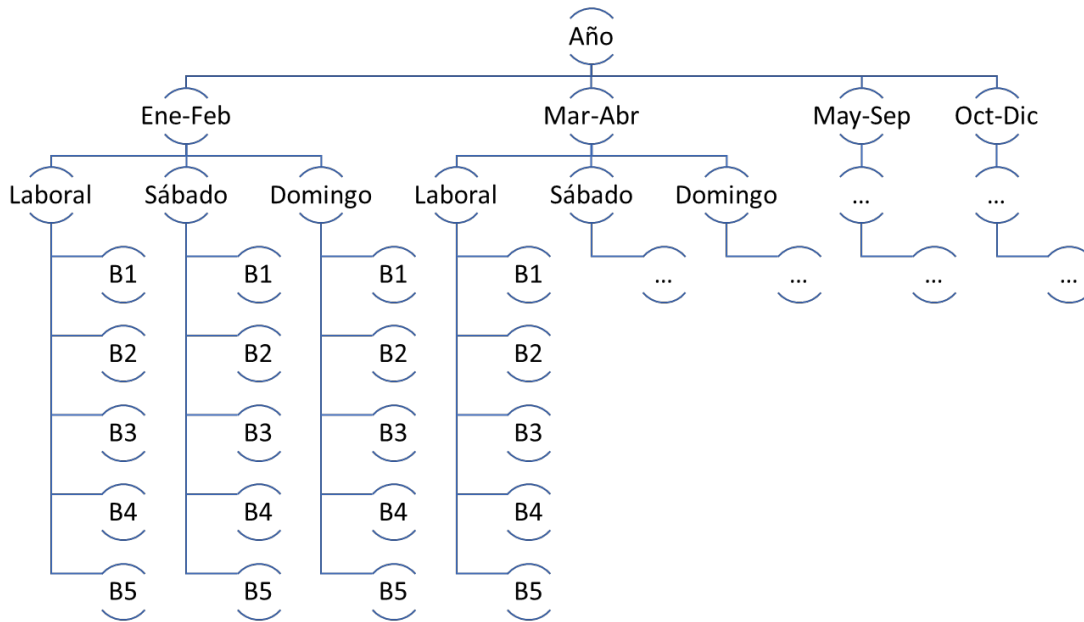


Figura 4. Arquetipo de la división temporal en el modelo TIMES-CO.

En resumen, TIMES-COL modela el sistema energético colombiano en un horizonte que comprende varias décadas donde cada año modelado está dividido en 60 periodos de diferente duración. Esta subdivisión se hace primordialmente para representar de la mejor manera posible las interacciones en el sector eléctrico, sin que este sea su único uso y sin pretender convertir a TIMES-CO en un modelo de despacho (ver figura 4).

2.2 Resolución espacial

En la versión actual del modelo TIMES-CO, el país es una región única. Sin embargo, en los planes de desarrollo del modelo se considera la necesidad de representar varias regiones internas para poder diferenciar las fuentes de energía y los consumos según su ubicación geográfica en el país.

2.3 Tecnologías

Las tecnologías (también llamadas procesos) son representaciones de dispositivos físicos que transforman unos energéticos en otros energéticos o servicios de energía. Los procesos pueden ser de suministro de fuentes primarias de energía (por ejemplo, procesos de extracción, procesos de importación), actividades de transformación (plantas de generación eléctrica, refinerías) o dispositivos de demanda de uso final como automóviles y sistemas de refrigeración.

El modelo TIMES-COL incluye la caracterización de la base tecnológica disponible los años de calibración y las tecnologías disponibles a lo largo del periodo de modelación.

2.3.1 Energía primaria

Se consideran en el modelo dos tipos de energéticos primarios: fósiles y renovables. Los dos pueden ser producidos localmente, sujeto a las disponibilidades consideradas en cada a ser evaluado y a los costos de producción determinados por las tecnologías existentes o futuras para su disposición. Los energéticos primarios fósiles considerados en TIMES-CO son el carbón, gas natural y petróleo. Cada uno de estos energéticos está caracterizado por unas reservas actuales e incorporaciones futuras (siendo esta una variable de escenario) y los costos de producción asociados. También, para el caso de los energéticos fósiles primarios se modela la tecnología de importación o exportación. Por otro lado, los energéticos renovables primarios no son objeto de comercio internacional. Entre los recursos renovables primarios considerados en el modelo están: el recurso hídrico, el viento, el sol y la biomasa. Estos recursos se caracterizan por su disponibilidad anual, estacional o intradiaria según corresponda.

2.3.2 Energía secundaria

Se han modelado las refinerías principales del país y estas se diferencian en las capacidades de procesamiento, las flexibilidades en sus dietas, en los niveles de producción y las eficiencias de transformación. Los energéticos derivados del petróleo pueden obtenerse, en el modelo, a través de los procesos de refinación y son objeto de comercio internacional.

En el modelo también se representan las tecnologías genéricas de producción eléctrica con recurso hídrico, viento, gas natural, carbón, combustibles líquidos y sistemas de cogeneración. Cada una de estas tecnologías está caracterizada por sus costos, capacidad instalada, eficiencias y disponibilidad anual, estacional, o intradiaria.

2.3.3 Consumo final

En TIMES-COL se representan los consumos finales de los sectores residencial, comercial, industrial, transporte y otros (extracción de minerales, agricultura, construcción). Cada uno de esos sectores está caracterizado por unos requerimientos de servicios energéticos que deben ser satisfechos. Los sectores están divididos en categorías y en sus demandas de servicios

energéticos típicos. En la Figura 5 se presenta parte de la desagregación de los sectores de demanda final de energía.

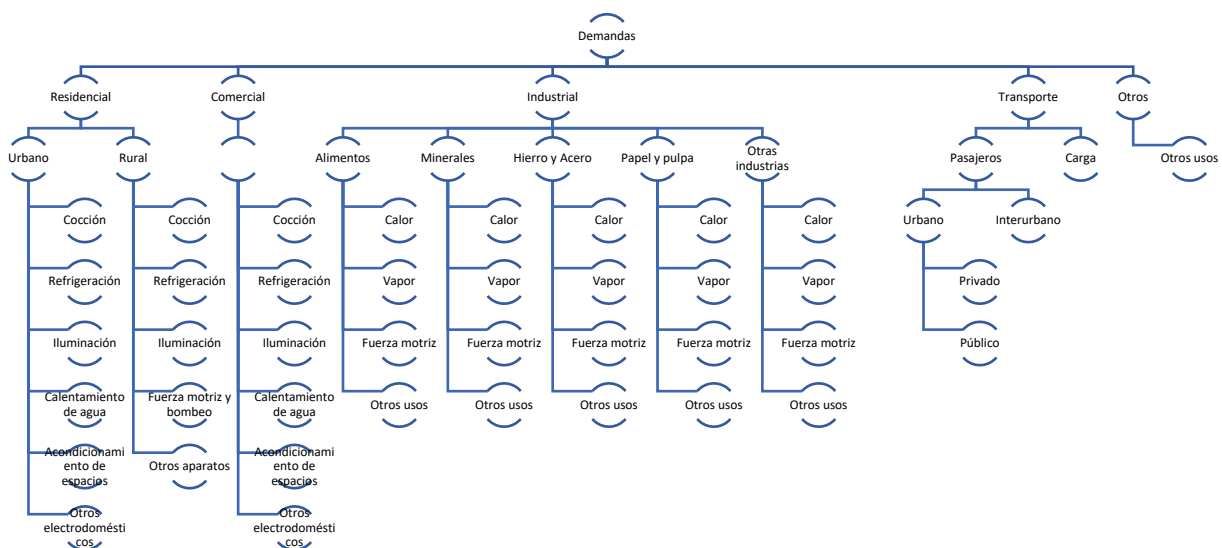


Figura 5. Desagregación de los sectores de los principales sectores de demanda final de energía en el modelo TIMES-COL