





imagen

Detalle de los mandos de un vehículo convencional. El modelo energético E3.0 apuesta por el desarrollo de un sistema de transporte inteligente (STI).

© PEDRO ARMESTRE

---

# Escenarios

---

# 3

En este punto pasamos a desarrollar los escenarios que configuran la parte fundamental de este trabajo.

## 3.1 Generalidades sobre los escenarios

En este trabajo hemos dedicado bastante esfuerzo a desarrollar escenarios, tanto bajo un contexto continuista que denominamos BAU, como bajo un contexto de eficiencia que denominamos E3.0, que nos permitan adquirir una perspectiva de las posibilidades en las que se nos podría desplegar el futuro energético.

Los escenarios, apoyándose en la evolución histórica pero incorporando el efecto de potenciales mecanismos de cambio, si bien como tales escenarios que son no dejan de ser hipotéticas trayectorias de evolución futura sin capacidad de discernir cual será la trayectoria que finalmente seguiremos, tienen la capacidad de aportarnos evaluaciones cuantificadas del efecto de diversas actuaciones, y de permitirnos una toma de conciencia sobre el potencial de distintas aproximaciones.

De esta forma, los escenarios pueden permitirnos romper tabúes tales como el planteamiento derrotista de que en la situación actual del mundo, con grandes economías emergentes y la economía de los países desarrollados en crisis, no hay más opción que seguir por la senda BAU que nos ha llevado al límite del abismo. Otras realidades son posibles, y los escenarios al desplegarlos y cuantificarlos su potencial, nos permiten tomar conciencia del peso que pueden tener y de las opciones de modificar el statu quo que nos brinda, de tal forma que no abandonemos de antemano con una actitud derrotista la opción de perseguir estas otras realidades.

En este sentido, la aportación relevante que nos pueden proporcionar los escenarios es la asociación cuantificada entre resultados finales y medios o mecanismos que es preciso poner en práctica para alcanzar estos resultados. Ello nos proporciona criterio para iniciar el recorrido por las líneas de evolución que potencialmente nos pueden conducir a plasmar estos escenarios en una realidad.

### 3.1.1 Escenarios de integración de renovables y eficiencia

La eficiencia en el uso de los recursos es una característica de la inteligencia.

En el informe (GP, 2007) presentamos diversos escenarios en los que se comprobaba la viabilidad técnica y económica de cubrir totalmente la demanda eléctrica BAU basándose en energías renovables, sin participación alguna de la gestión de la demanda y con una penetración muy limitada de las medidas de eficiencia energética en el consumo de energía.

En este informe, por un lado planteamos el conjunto del sistema energético, y por otro lado exploramos las posibilidades y potencial de la incorporación de inteligencia global en el funcionamiento de nuestros sistemas: el objetivo es cubrir unos servicios<sup>185</sup> requeridos para el funcionamiento de nuestra sociedad con el mínimo uso de recursos.

Por tanto, la eficiencia energética y la participación activa de todos los actores (gestión de la demanda) forman una parte esencial de los planteamientos en los escenarios E3.0 de este informe, lo que conduce a una gran reducción de los recursos renovables que es preciso movilizar.

Esta reducción de recursos renovables a utilizar, tiene consecuencias favorables desde

<sup>185</sup> El objetivo son los servicios, y no la demanda energética asociada con la que actualmente cubrimos estos servicios.

diversos aspectos: ocupación del territorio por la infraestructura de generación y transporte, movilización de recursos financieros para acometer las inversiones necesarias, uso de materiales para construir los equipos de generación requeridos, etc.

Adicionalmente, esta reducción tiene la capacidad de introducirnos realmente en una senda de sostenibilidad, limitando nuestra demanda a los recursos disponibles. En efecto, en el informe (GP, 2007) constatamos que el potencial de las energías renovables en nuestro país nos permitiría cubrir de forma holgada<sup>186</sup> la demanda energética en el escenario para el año 2050 que allí desarrollamos. Pero en principio aspiramos a que la historia de la humanidad no se acabe en el año 2050, por lo que al mantener las trayectorias tendenciales de crecimiento mantenido de la demanda energética antes o después<sup>187</sup> agotaríamos el potencial de las energías renovables en nuestro país, por lo que nuestro sistema energético seguiría sin ser sostenible.

Pero es más, según las aproximaciones que adoptáramos para cubrir con renovables la demanda energética BAU, al requerir una participación mayor de algunas fuentes renovables particularmente escasas en nuestro país, incluso para el año 2050 no tendríamos capacidad de cubrir la demanda BAU<sup>188</sup>.

Por último, desde el punto de vista económico, si bien la contención y contracción de la demanda mediante incorporación de medidas de eficiencia, y la involucración activa de la demanda en la operación del sistema energético pueden conducir a un incremento del coste de la unidad de energía producida, el coste total, obtenido como producto de la energía producida, y su coste unitario es considerablemente inferior, y lo mismo sucede por cantidad absoluta de servicio proporcionado<sup>189</sup>.

### 3.1.2 Escenarios macro y de abajo-a-arriba

Tradicionalmente existen dos aproximaciones para elaborar escenarios: las macro y las de abajo-a-arriba.

Por un lado encontramos las aproximaciones macro, que buscan correlacionar la variable dependiente sobre la que se quiere elaborar el escenario con algún indicador macro del cual ya se dispone de escenarios. Un ejemplo muy típico en el campo de los escenarios energéticos es buscar correlacionar la demanda de energía con el PIB. Las aproximaciones macro tienen la virtud de “empaquetar” la complejidad de las interacciones del mundo real en un solo parámetro sobre el cual ya se tiene una proyección de la evolución futura<sup>190</sup>, y basándose en el análisis histórico de cómo se ha correlacionado este parámetro con la variable independiente en estudio se procede a su proyección.

Sin embargo, esta virtud de los análisis macro es también una gran debilidad, pues están muy limitados para incorporar los efectos de cambios estructurales que afecten a la variable independiente bajo análisis. Y en el caso que nos ocupa, la introducción de eficiencia y ahorro muy a menudo va ligada a cambios estructurales que no puede recoger una aproximación macro.

Por este motivo, la mayoría de escenarios que vamos a elaborar en este estudio parten de una aproximación de abajo-a-arriba, en la que se aplican cambios estructurales en múltiples variables independientes y mediante modelado se evalúa el correspondiente cambio en la variable dependiente bajo análisis.

Sin embargo, en aquellos casos en que nos parezca adecuado, apoyaremos los procesos

<sup>186</sup> En concreto, el potencial de las renovables quedaba cuantificado como 56,4 veces la demanda de energía eléctrica BAU en 2050, o 10,4 veces la demanda de energía total proyectada para el año 2050.

<sup>187</sup> Más bien antes, tal y como ilustramos con un ejemplo más adelante.

<sup>188</sup> Este punto lo ilustramos más adelante con un análisis de las opciones de cubrir la demanda energética del sector edificación basándose en una aproximación descentralizada de la aplicación de las renovables, que agotaría las posibilidades del recurso de la biomasa antes de llegar al año 2050.

<sup>189</sup> Tal y como muestran los ejemplos de modelo de negocio citados en la bibliografía.

<sup>190</sup> Esperada o deseada.

de extrapolación o contrastación en planteamientos macro para algunas de las variables consideradas.

### 3.1.3 Escenarios BAU y eficientes

En este estudio presentamos múltiples escenarios sectoriales y subsectoriales para acabar configurando con ellos los escenarios de demanda energética.

Fundamentalmente diferenciamos entre dos contextos para desarrollar los escenarios: el contexto BAU y el contexto E3.0.

Los escenarios planteados bajo el contexto BAU son escenarios que reflejan las tendencias actuales asociadas a un compromiso limitado con la reducción de emisiones. Si bien podemos interpretarlos como escenarios tendenciales a partir de la situación actual, son BAU más progresistas que los que podríamos haber esbozado hace unos pocos años, con tendencias que apuntan en la dirección correcta pero con insuficiente intensidad.

Los escenarios planteados bajo el contexto E3.0 son escenarios de evolución del consumo energético bajo planteamientos de eficiencia energética, presuponiendo que los cambios estructurales necesarios para internalizar las medidas de eficiencia propuestas pueden aplicarse instantáneamente. Por tanto, para un año dado, el paso del BAU al E3.0 requeriría cambios en escalón que no siempre son posibles de implementar.

Sin embargo, es preciso tener en cuenta dos aspectos:

- La introducción de inteligencia en los sistemas energético, económico, político y social constituye uno de los elementos fundamentales

de los planteamientos E3.0. Y esta introducción de inteligencia sí que permite materializar cambios en escalón que son impensables bajo la perspectiva BAU. De hecho, dadas las grandes restricciones que nos impone la inactividad a nivel global para atajar las causas del cambio climático, es muy probable que la única opción que nos quede a estas alturas es la implementación de cambios en escalón. En este sentido, los saltos finitos del contexto BAU al contexto E3.0 para un año dado pasan a ser más viables de lo que aparentan en un principio.

- Por otro lado, los escenarios BAU y E3.0 en general no son escenarios de transición, sino escenarios extremos<sup>191</sup>. La idea fundamental es que de acuerdo con los escenarios extremos BAU y E3.0, posteriormente se puede elaborar cualquier escenario de transición sin más que asignar un escenario de tasa de transición del BAU al E3.0, que vaya desde un 0% en el instante actual hasta el porcentaje de máxima transición a un contexto E3.0, para el final del escenario que se pretenda analizar. En este sentido, cuando resulte procedente distinguiremos entre escenarios de tecnología E3.0, y escenarios E3.0 que ya incorporen un escenario de transición desde el contexto BAU.

### 3.1.4 Escenarios de transición

Como comentábamos en el punto anterior, a menudo se nos presentan escalones finitos desde el inicio de los escenarios entre las evoluciones BAU tendenciales y los escenarios de tecnología E3.0. En concreto, siempre que el contexto E3.0 implique un cambio tecnológico fundamental<sup>192</sup>, nos encontraremos con estos escalones.

Sin embargo, la transición desde el contexto BAU al E3.0 requerirá seguir una trayectoria

**191** Aunque los escenarios BAU sí que pretenden recoger al mismo tiempo una visión optimista de cómo podríamos evolucionar en contexto BAU.

**192** Estos saltos finitos en el año inicial del desarrollo de los escenarios obedecen a la consideración de soluciones tecnológicas distintas en los contextos BAU y E3.0, pero realmente no introducen ninguna diferenciación conceptual respecto a las situaciones en las que el escenario E3.0 se desarrolla de forma gradual partiendo del mismo punto inicial que el escenario BAU; en ambos casos la evolución final estará sujeta a un escenario de transición para pasar de la trayectoria BAU a la E3.0. Veamos un caso concreto que ayude a centrar este planteamiento: para la movilidad por carretera de pasajeros, el contexto E3.0 recurre tanto a una electrificación de los vehículos como al incremento de los factores de capacidad con los que se usan. En el caso de la electrificación, el cambio de tecnología implica un salto finito en el instante inicial, siguiendo posteriormente la tecnología E3.0 una trayectoria de evolución hasta llegar al año 2050 final de nuestro escenario. En el caso del incremento de los factores de capacidad, su despliegue e incorporación al sistema se puede anticipar como más gradual, de tal forma que los vehículos eléctricos introducidos al inicio del escenario se usarán con el mismo factor de capacidad que los vehículos de combustible fósil del contexto BAU. El efecto final debido a la evolución de estos dos factores definirá una trayectoria E3.0 a la que deberemos evolucionar desde una trayectoria BAU, para lo cual podremos seguir distintos escenarios de transición. Sin embargo, para diferenciar estas dos situaciones, los escenarios E3.0 que parten del mismo punto inicial que el contexto BAU los designaremos como E3.0, mientras que aquellos que parten de un punto inicial distinto los designaremos como tecnología E3.0.

progresiva, más o menos acentuada según el ritmo de implementación de los cambios estructurales requeridos.

El objetivo de este informe es el análisis del horizonte en el año 2050, motivo por el cual el proceso de transición en principio no afecta a los análisis realizados. Sin embargo, puesto que nos parece interesante resaltar algunos aspectos asociados al proceso de transición, hemos querido cuantificar algunas de las posibles trayectorias de transición.

Partiendo de un estado inicial (contexto BAU) y de un punto final en el año 2050 para el contexto E3.0, existe una infinidad de trayectorias que podemos seguir en el proceso de transición, y dependerá de la intensidad con la que consigamos articular los procesos de cambio. A lo largo de este informe hemos querido retener tres de estas posibles trayectorias:

- Escenario de transición retardado: describe un escenario en el que retardamos el proceso de transición hacia la tecnología E3.0.

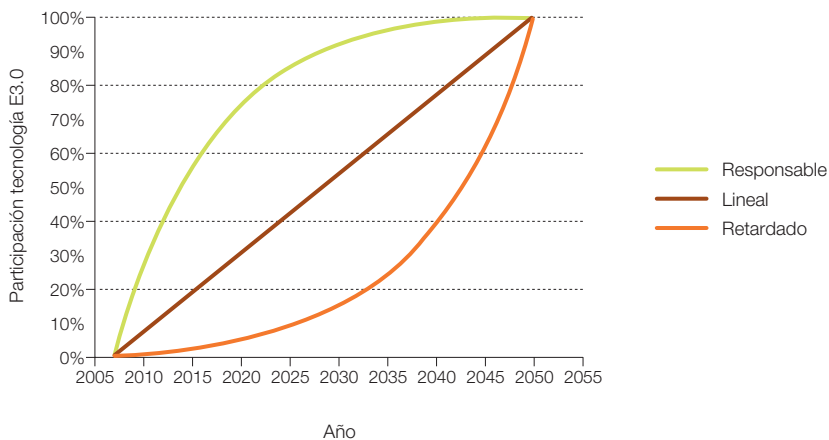
- Escenario de transición lineal: describe un escenario en el que el proceso de incorporación de la tecnología E3.0 es lineal en el tiempo.

- Escenario de transición responsable: describe un escenario en el que aceleramos la incorporación de la tecnología E3.0 en los primeros años del escenario para dar respuesta a los requerimientos del sistema climático.

En la figura 50 mostramos la evolución de la participación de la tecnología E3.0 en cada uno de estos escenarios de transición.

En estas condiciones, al darse un escenario BAU tendencial, y una evolución a lo largo del tiempo de las prestaciones potenciales que nos proporcionaría la tecnología E3.0 para cada uno de los sectores o subsectores energéticos, asociado a cada uno de los escenarios de transición, tendremos una evolución a lo largo del periodo de tiempo considerado del consumo energético. La figura 51 nos

**Figura 50.** Evolución de la participación de la tecnología E3.0 para los tres escenarios de transición considerados.



ilustra esta situación para un caso hipotético y un escenario de transición retardado.

Como podemos observar, dadas las tendencias BAU y de tecnología E3.0 a lo largo del periodo de tiempo considerado, es muy fácil que un escenario de transición E3.0 nos conduzca a un pico de la demanda de energía en el interior del periodo considerado. Estos picos traen como consecuencia una necesidad de sobredimensionar las estructuras energéticas, probablemente con tecnologías BAU, por lo que pueden hipotecar la capacidad de alcanzar el punto final deseado en el año 2050 como consecuencia de las resistencias a la transición que surgirán si las inversiones correspondientes a estas infraestructuras energéticas no se pueden amortizar<sup>193</sup>.

Otra característica que ilustra esta figura sobre los escenarios de transición retardados es el hecho de que siempre requieren desplegar unas elevadas tasas de cambio durante periodos de tiempo prologados como resultado de haberse mantenido más tiempo cerca de

la trayectoria BAU. Estas elevadas tasas de cambio, se traducen inevitablemente en mayores costes del proceso de transición.

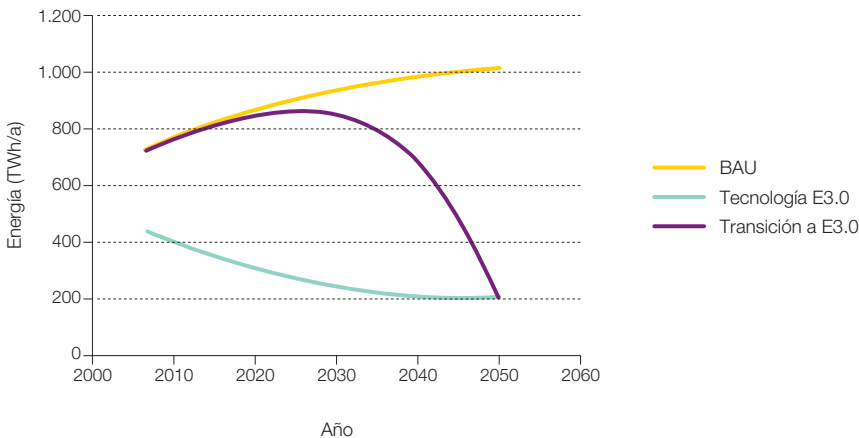
## 3.2 Evolución histórica

Uno de los puntos importantes para la elaboración de escenarios es la evolución histórica de las variables relevantes. Una "monitorización" deficiente de dichas variables a lo largo del tiempo introduce muchas limitaciones, tanto para poder diagnosticar el estado actual del sector, como para elaborar escenarios que se apoyen en las tendencias pasadas.

En España, por lo general, la "monitorización" de las variables relevantes para elaborar escenarios energéticos es muy deficiente. Los datos se encuentran desperdigados en muchos foros de alcance parcial, y presentan serias deficiencias e incongruencias entre ellos.

Por otro lado resulta interesante recalcar la parcialidad con la que a menudo se recopilan

**Figura 51.** Ejemplo de la relación entre los distintos escenarios. En este caso, el escenario de transición de BAU a tecnología E3.0 es el retardado.



**193** Esta es la situación que estamos viviendo en la actualidad con el boicoteo del sector de los ciclos combinados al desarrollo de las energías renovables, ocasionado por el hecho de que el ritmo de crecimiento de las energías renovables reduce el factor de capacidad de las centrales de ciclo combinado (ahorran combustible fósil), y por tanto no permite amortizar las instalaciones de ciclos combinados impulsadas fuera de tiempo como consecuencia de un serio error de planificación energética a finales de la década de 1990.

los datos relativos al consumo energético y emisiones de un país. Como ejemplo, en (MacKay, JC D., 2008) encontramos una comparación de las emisiones per cápita de GEI en el Reino Unido con la contabilidad actual (11 tCO<sub>2</sub>-eq/p-a) y lo que se obtendría si se tuvieran en cuenta las emisiones asociadas a todos los productos que se importan en el Reino Unido (21 tCO<sub>2</sub>-eq/p-a), que conduce prácticamente a doblar el valor de las emisiones per cápita de este país. En (Santacana, M., et al., 2008) indican que para el caso de España en el año 2005 las emisiones de GEI en el año 2005 se incrementaban un 16,9% (1,68 tCO<sub>2</sub>-eq/p-a) respecto a las emisiones interiores del país recogidas en el inventario de emisiones de GEI español para ese año, como consecuencia del balance entre importaciones y exportaciones, hasta situarse en 11,68 tCO<sub>2</sub>-eq/cap.

### 3.3 Clima

Uno de los objetivos<sup>194</sup> de potenciar la transición desde un contexto BAU a uno E3.0 es evitar un cambio climático de origen antropogénico que vaya más allá de lo que podemos considerar seguro para el conjunto de habitantes y ecosistemas de este planeta.

Sin embargo, la situación en la que nos encontramos actualmente no es en absoluto neutra respecto a la posibilidad de que experimentemos un cambio climático: los puntos límites del sistema climático ya han sido superados por el forzamiento de origen antropogénico, y simplemente nos encontramos en el lapso de tiempo que nos proporciona la capacidad inercial del sistema climático para ver si somos capaces de invertir el forzamiento ya realizado, antes de que el sistema climático alcance un punto de no retorno desde el que ya resulte imposible evitar que se desencadenen

los efectos indeseados del forzamiento al que ya hemos sometido al clima. La falta de capacidad resolutoria que constatamos en nuestros políticos en las negociaciones internacionales de cambio climático, no permite concebir demasiadas esperanzas de que realmente seamos capaces de invertir el proceso en el plazo de tiempo disponible.

Si a esto le añadimos que hay efectos del cambio climático que ya se dejan sentir de forma significativa en todo el planeta y particularmente en nuestro país (Martínez Linares, J., 2009), resulta dudoso que podamos asumir de cara al futuro que el clima se mantendrá igual al que conocemos hasta ahora. Esto es especialmente cierto para un contexto BAU en el que lejos de invertir el forzamiento climático de origen antropogénico, procedemos a incrementarlo todavía más. Pero incluso en el contexto E3.0, y teniendo en cuenta el carácter global de la física del sistema climático, parece difícil que podamos regresar a las condiciones climáticas actuales.

Para los análisis desarrollados en este estudio, el clima tiene un efecto significativo sobre diversos aspectos:

- La demanda energética de algunos sectores, como es el caso del de la edificación, va a verse modificada por los efectos del cambio climático. En general cabe esperar un incremento de la demanda de refrigeración y una reducción de la de calefacción, dependiendo el efecto global de la severidad climática de invierno en el emplazamiento considerado. Para España, como comentaremos posteriormente cabe esperar un incremento de la demanda total de climatización de los edificios.
- Los recursos de las tecnologías renovables, en general se verán modificados por el

<sup>194</sup> Además de evitar una situación de cambio climático con grandes impactos, hay otros objetivos asociados a la potenciación de la transición de un contexto BAU a uno E3.0. Uno de ellos es sencillamente establecer un modelo de desarrollo sostenible capaz de ser exportado al conjunto de la población del planeta. Otros objetivos están asociados a planteamientos de equidad para que las herramientas necesarias para desarrollar una sociedad estén al alcance de todos.



cambio climático. El signo de la modificación depende del recurso específico. Así, cabe esperar una reducción del recurso hídrico, pero un incremento del recurso solar.

Para elaborar los escenarios presentados en este informe, así como para analizar la operación del sistema energético basado en energías renovables hacemos un uso extensivo de años meteorológicos tipo (TMY)<sup>195</sup> en cada una de las provincias peninsulares:

- Para evaluar la demanda horaria del parque de edificios se han realizado simulaciones dinámicas de los distintos tipos de edificios sometidos a los TMY de cada provincia.
- Para evaluar la secuencia horaria de la capacidad de generación de cada una de las distintas tecnologías renovables consideradas, se han realizado simulaciones de las centrales sometidas a los TMY de cada provincia.

Por tanto, tiene interés explorar la evolución que cabe esperar de los TMY. Lo ideal sería desarrollar este estudio con dos conjuntos de TMY, uno para el contexto BAU (correspondiente a un escenario de elevadas emisiones), y otro para el contexto E3.0 con emisiones significativamente inferiores, con la dificultad añadida de que el escenario climático resultante no depende tan solo de cómo evolucionen las emisiones en España (el alcance de este estudio), sino en el conjunto del mundo.

### 3.3.1 Revisión de la información relativa al cambio climático

Se ha avanzado mucho en la elaboración de información relativa a la evolución del clima de acuerdo con los distintos escenarios de emisiones. A nivel planetario, los modelos

de circulación general atmósfera-océano (AOGCM) han ido evolucionando en su capacidad de predecir la evolución de las distintas variables climáticas, y se han recogido sus resultados en los sucesivos informes del IPCC. La aplicación de técnicas de regionalización sobre estos modelos globales, tanto estadísticas como dinámicas (RCM), ha proporcionado desde la publicación del tercer informe del (IPCC, 2001) información de mayor detalle regional para poder empezar a afinar en la magnitud del impacto del cambio climático a nivel local.

En España, en (de Castro, M.; Martín-Vide, J. y Alonso, S., 2005) encontramos unos primeros resultados de aplicación de técnicas de regionalización dinámica para España a los resultados de modelos globales desarrollados en el marco del tercer informe del (IPCC, 2001), para los escenarios de emisiones del IPCC A2 y B2<sup>196</sup>. En esta referencia se presentan resultados promedios a nivel estacional (invierno, primavera, otoño y verano) para el periodo 2071-2100, sobre temperaturas medias, precipitaciones, evapotranspiración y velocidad del viento. La tendencia de las temperaturas medias es generalizada al crecimiento, con incrementos mayores en verano que en invierno, y un mayor incremento en las temperaturas medias máximas que las medias mínimas, por lo que se incrementa la oscilación de temperaturas respecto al clima actual. Las temperaturas máximas (percentil 90) se incrementan de forma importante en primavera, significativamente por encima de las medias máximas diarias, lo que indica una intensificación de las condiciones extremas. Por lo que respecta a la precipitación se presentan reducciones prácticamente en todas las estaciones, excepto en invierno, donde hay un incremento en la mitad norte (especialmente hacia el oeste). Respecto a la velocidad del viento, se muestran incrementos en verano y

<sup>195</sup> El TMY (Typical Meteorological Year) es un archivo en el que se recoge la evolución de las distintas variables meteorológicas (temperatura, humedad, irradiación solar, velocidad del viento, etc.) a lo largo de un año (8.760 horas / año) que se considera representativo de las condiciones climáticas medias del emplazamiento.

<sup>196</sup> Debemos resaltar, que los escenarios de emisiones A2 y B2 conducen a concentraciones de CO<sub>2</sub>-eq significativamente superiores a las 450 ppm, y consecuentemente a incrementos de temperatura superiores a los 2 °C. En concreto, para el año 2100 (lejos de haberse estabilizado) el escenario A2 conduce a una concentración de CO<sub>2</sub> de unas 850 ppm y el B2 de 760 ppm. En este sentido, debemos considerar estos dos escenarios como situaciones a evitar.

reducciones en el resto de estaciones en la mayoría de la península.

Los valores presentados en esta referencia son insuficientes para modificar los TMY que empleamos para realizar las simulaciones asociadas al sistema energético por los siguientes motivos:

- Están disponibles tan solo de forma gráfica y no numérica<sup>197</sup>.
- Son promedios estacionales (tres meses), lo cual no proporciona suficiente detalle para aproximar<sup>198</sup> el cambio de tendencia a lo largo del año.
- Se trata de promedios para el periodo 2070-2100, más allá del alcance de nuestro estudio.
- Están asociadas a unos escenarios de emisiones A2 y B2 que conducen a unas concentraciones globales de CO<sub>2</sub> muy superiores<sup>199</sup> a las que se pretende alcanzar con el contexto E3.0.
- No contienen información de variables climáticas necesarias para la simulación del sistema energético (humedades, nubosidad, iluminancia y radiación solar).

En (Abanades García, J.C., et al., 2007) se presenta una recopilación de los resultados de los escenarios climáticos regionales para España, pero desde el punto de vista del modelado del efecto del cambio climático sobre los TMY a emplear en este estudio, no añade información relevante respecto a la referencia anterior. A nivel cualitativo añade información sobre la humedad relativa, y menciona que la tendencia será a la reducción, de forma más acentuada en verano, y sobre la irradiación solar, que aumentará como consecuencia de la reducción de la nubosidad,

excepto en invierno que permanecerá del orden de la actual. Respecto a la velocidad del viento menciona que prácticamente no habrá variaciones, lo cual no concuerda con los resultados de los modelos regionales de la referencia anterior.

En (Brunet, M., et al., 2009) encontramos la información más reciente relativa a escenarios regionalizados de cambio climático en España. Este informe, publicado por la AEMET, constituyó una de las primeras actividades del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático aprobado en el año 2006. El objetivo de este trabajo era poner a disposición de los distintos colectivos, datos de escenarios regionales de cambio climático, para así poder avanzar en la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. En principio se trataba de poder sacar unos primeros resultados de forma rápida, para hacer accesibles al público los resultados actuales de los modelos regionales, y posteriormente elaborar más estos resultados y hacer accesible más, y más actualizada información correspondiente a los escenarios regionalizados en España. Sin embargo, parece que desde la primera publicación de resultados no se ha progresado en la línea planificada, pues el informe disponible en la web de la AEMET al redactar este informe (2/2010) sigue conteniendo tan solo la información correspondiente a los resultados inicialmente presentados.

Esta referencia presenta, por un lado, resultados más detallados de la evolución de las variables climáticas según distintos modelos globales y técnicas de regionalización<sup>200</sup>, sin procesar el conjunto de la información disponible en el formato de la evolución más probable, según la fiabilidad de las distintas proyecciones, y al anunciar la disponibilidad de los distintos resultados con una resolución diaria<sup>201</sup>.

**197** Lo cual reduce la precisión de cara a su uso.

**198** Como comentaremos más adelante, la modificación de TMY llevada a cabo de acuerdo con los modelos climáticos de regionalización en otros países como el Reino Unido, partía de los valores mensuales.

**199** Si bien pueden corresponderse con la evolución BAU.

**200** En concreto, la base de datos generada hace uso de cinco modelos globales, 10 modelos regionales de clima (RCM) y cuatro técnicas de regionalización empíricas, así como de dos escenarios de emisión (A2 y B2).

**201** Esta resolución diaria es superior a la empleada en otras referencias que posteriormente mencionaremos para modificar los TMY de acuerdo a estos escenarios de cambio climático mediante *morphing*. En concreto, para el caso del Reino Unido, se han producido TMY oficiales adaptados a distintos escenarios de cambio climático. Pero el proceso de *morphing* tiene importantes limitaciones para reproducir la secuencia horaria, y en el caso de intentar aplicarlo a nivel diario, conlleva un volumen de trabajo que no queda justificado ante la posibilidad de disponer directamente de los datos horarios procedentes de los modelos de regionalización, que en este caso debería hacer disponible la AEMET.

Los escenarios de emisiones considerados en este informe son tan solo los A2 y B2 descritos en el Informe Especial de Escenarios de Emisión (SRES) del IPCC publicado en 2000. Si bien los escenarios SRES (2000) han servido de base también para el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, los casos A2 y B2 son sin embargo, como comentábamos anteriormente, escenarios que conducen a concentraciones de GEI e incrementos de temperatura muy superiores a los que deberíamos permitir, lo que difiere, por tanto, significativamente de lo que cabría esperar en un contexto E3.0.

Sin embargo, los resultados que se presentan en esta referencia proceden de las simulaciones con modelos globales realizadas en el marco del tercer informe del (IPCC, 2001), es decir, no incorporan las mejoras y actualizaciones correspondientes al cuarto informe del (IPCC, 2007). Sobre estos resultados se han aplicado por un lado distintas técnicas de regionalización estadística, para generar información de temperaturas y precipitaciones en distintos intervalos de tiempo, y por otro lado se han recogido resultados de aplicaciones pasadas de técnicas de regionalización dinámica basadas en ejecuciones de modelos regionales del clima (RCM) en el marco de un proyecto europeo<sup>202</sup>. Estos resultados procedentes de RCM son los más detallados, por proporcionar información de otras variables climáticas<sup>203</sup> necesarias para confeccionar un TMY más allá de las temperaturas y las precipitaciones. Sin embargo, estos resultados están disponibles tan solo para el periodo 2071-2100, además de seguir sin estar actualizados a los resultados de los modelos empleados en el cuarto informe del IPCC.

Los resultados a nivel mensual del procesado de esta base de datos disponible que se presentan en (Brunet, M., et al., 2009) muestran las siguientes tendencias:

- Temperaturas: incrementos de medias, máximas y mínimas. Pero incrementos de las máximas mayores que las mínimas, e incrementos en verano mayores que en invierno.
- Precipitación: menor consistencia de los resultados entre los distintos modelos. Pero parece apuntar a una disminución anual, con posible incremento invernal y gran disminución primavera-verano.
- Nubosidad: reducción excepto en invierno.
- Humedad relativa: disminución.
- Velocidad del viento: reducción en invierno e incremento estival.

Esta información, si bien es más detallada, sigue siendo insuficiente para adaptar los TMY a los escenarios de cambio climático.

Ya han empezado a aparecer estudios que analizan el impacto sobre distintos sectores del sistema energético de estas proyecciones de cambio climático.

En (Isaac, M.; Van Vuuren, D.P., 2009) se presenta un análisis del efecto del cambio climático sobre la demanda de energía del sector edificación residencial. A nivel global, para el año 2100 prevén que el cambio total de demanda de energía se encontrará acotado debido a que se compensarán parcialmente las reducciones de demanda de calefacción con los incrementos de demanda de refrigeración, sin embargo, el impacto por separado sobre la demanda de calefacción y de refrigeración a nivel global es considerable, para reducirse la primera en un 34% e incrementarse la segunda en un 72% para el año 2100 a nivel global. A nivel local, el efecto sobre la estructura de la demanda de energía y sobre su valor absoluto puede ser significativo. Indican

**202** PRUDENTE: Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects, EU 5th Framework Project.

**203** En concreto parece que hay disponible información de humedades, radiación solar y velocidades del viento.

que para emplazamientos con más de 2.200 grados-día de calefacción<sup>204</sup>, el cambio climático tiende a reducir más la demanda de calefacción de lo que aumentará la demanda de refrigeración, y por tanto se experimentará una reducción de la demanda total de energía para esos edificios residenciales. En España, la inmensa mayoría de emplazamientos<sup>205</sup> tienen menos de 2.200 grados-día de calefacción, y por tanto el efecto del cambio climático será a aumentar la demanda de energía de los edificios residenciales. Dado que en los edificios no residenciales es habitual que nos encontremos con un mayor nivel de generación interno de calor y de ganancias solares, cabe esperar que en ellos todavía sea mayor el incremento de energía total demandada por los edificios como consecuencia del cambio climático. Incluso en el Reino Unido esperan que el incremento de la demanda de refrigeración sea superior a la reducción de la demanda de calefacción.

A nivel global, el escenario desarrollado en esta referencia<sup>206</sup>, en el que se incluye la evolución del nivel adquisitivo y de la internalización de las demandas de climatización a lo largo del mundo, pronostica que la situación pasará de un claro predominio<sup>207</sup> a nivel global de la demanda de calefacción sobre la de refrigeración, a que ambas demandas se encuentren equilibradas<sup>208</sup> en torno al año 2070, a partir de cuyo momento la demanda de refrigeración que mantiene elevadas tasas de crecimiento hasta bien pasado el año 2100 se establece como la demanda energética dominante<sup>209</sup> para climatizar los edificios residenciales.

En (Jentsch, M.F. et al., 2008) presentan resultados asociados a la generación de TMY pos cambio climático oficiales para el Reino Unido a partir de la regionalización de los resultados proporcionados por los modelos globales de cambio climático. El procedimiento seguido es

un *morphing* de los TMY actuales empleando valores mensuales de previsión de cambio climático bajo cuatro escenarios de emisiones, produciendo y poniendo a disposición de los usuarios la información en dos formatos típicos<sup>210</sup> de archivos climáticos para simulaciones de edificios y de sistemas energéticos. Una conclusión interesante es que los procedimientos de *morphing* reproducen las secuencias del clima actual, por lo que no recogen los episodios extremos ni modificaciones del ciclo diario. A nivel de curiosidad, en el marco del estudio comentado por esta referencia se procedió a monitorizar un edificio, y coincidió con la existencia de una ola de calor en el Reino Unido durante el verano de 2006, de tal forma que las condiciones experimentadas por el edificio fueron peores a las que proporcionaba el TMY<sup>211</sup> pos cambio climático para el año 2050. La conclusión es que lo interesante sería poder disponer directamente de las secuencias horarias de evolución de las variables climáticas que salen de los modelos regionales de cambio climático, en lugar de manipular los TMY del clima actual con unos escasos indicadores producidos por los modelos de cambio climático.

### 3.3.2 Planteamiento adoptado en relación al cambio climático

Podemos concluir de lo anteriormente expuesto que cabe esperar una modificación significativa del clima en España como consecuencia de los efectos del cambio climático: incremento de temperaturas, incremento de oscilación de temperaturas (las temperaturas máximas subirán más que las mínimas), incremento de radiación solar, reducción de humedad relativa, reducción de precipitaciones, modificación de regímenes de vientos. Es decir, los TMY que representen la condición climática en la situación pos cambio climático serán distintos a los actuales.

**204** En esta referencia emplean una temperatura base de 18 °C para definir los grados día.

**205** A nivel de capitales de provincia, los valores proporcionados por la norma UNE 24 046 indican un valor máximo de los grados-día de calefacción en base 15 °C de 2.143 °C-día/a en León, y un mínimo de 208 °C-día/a en Almería, pasando por valores de 656 °C-día/a en Barcelona y de 1.405 °C-día/a en Madrid. El límite que indican en la referencia son 2.200 °C-día/a en base 18 °C, que en base 15 °C sería algo inferior.

**206** Este escenario de evolución de la demanda de energía del sector residencial está asociado a un escenario de emisiones que conduce a un incremento de temperatura de 3,7 °C para el año 2100.

**207** Predominio asociado a que los países que actualmente tienen mayor poder adquisitivo, y que por tanto han internalizado más la demanda de confort, se encuentran en latitudes elevadas en las que con el clima local claramente domina la demanda de calefacción frente a la de refrigeración.

**208** La demanda de calefacción experimenta un ligero crecimiento hasta el año 2030 en que los efectos del cambio de clima empiezan a dominar sobre el remanente a internalizar de esta demanda, para posteriormente experimentar un ligero decrecimiento continuo. Por otro lado, la demanda de refrigeración a nivel global empieza a experimentar un rápido crecimiento a partir del año 2011 debido al incremento del nivel económico en los países de latitudes medias donde incluso con el clima actual domina la demanda de refrigeración sobre la de calefacción.

**209** En el año 2100 la demanda de refrigeración del sector residencial a nivel global llega a ser bajo este escenario un 55% superior a la de calefacción (la diferencia sigue aumentando en el S.XXII), y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la demanda de refrigeración de un 155% superiores a las de calefacción (en este escenario BAU se pronostica una escasa introducción de renovables en el sistema eléctrico, por lo que la demanda de refrigeración, al cubrirse vía eléctrica, resulta más intensiva en carbono que la de calefacción).

**210** Concretamente TMY2 y EPW.

**211** Realmente no era un TMY sino un DMY de verano (año de diseño para condiciones de verano, es decir, incluso más extremo que el TMY).

Por tanto, parecería adecuado emplear unos TMY por cambio climático para desarrollar los análisis asociados a este estudio, en particular para generar la secuencia horaria de demanda energética del sector edificación, y para generar las secuencias de capacidad de generación eléctrica de las distintas tecnologías renovables.

Sin embargo, para emplear TMY por cambio climático nos encontramos con una serie de dificultades:

- Tomar una decisión sobre el escenario de emisiones que se va a desarrollar. La modificación del TMY es muy distinta según en qué escenario de emisiones nos coloquemos. Puesto que el objeto de potenciar la transición al contexto E3.0 es precisamente evitar los escenarios de elevadas emisiones, un planteamiento coherente con la adopción del contexto E3.0 en el conjunto del planeta como la que aquí defendemos nos debería decantar hacia un escenario de bajas emisiones y por tanto pequeña modificación climática.
- La información climática disponible en los escenarios climáticos regionalizados para España es actualmente insuficiente para poder generar TMY representativos de las nuevas condiciones climáticas. Por otro lado, esta información corresponde a escenarios de emisiones del IPCC (A2 y B2) que conducen a estabilizaciones de la concentración de CO<sub>2</sub> muy superiores a los 450 ppm, e incrementos de temperatura muy por encima de los 2 °C, de tal forma que estos son escenarios a evitar<sup>212</sup>. Además, esta información está asociada a los resultados del tercer informe del IPCC (2001), y está por tanto anticuada respecto a los resultados del cuarto informe del IPCC (2007).

- Las metodologías para generar TMY por cambio climático que parten de los TMY actuales y de la información de los escenarios regionales de cambio climático<sup>213</sup> son incompletas y limitadas, por lo que el TMY al que se llega no tiene por qué ser completamente representativo de las condiciones por cambio climático.

- En España<sup>214</sup> no existen TMY oficiales correspondientes a distintos escenarios de cambio climático.

- En el contexto actual recogido por los distintos escenarios de “cambio climático”, con una variación continua de las variables climáticas en tiempos característicos muy inferiores a los que anteriormente a la interferencia antropogénica seguía la evolución del clima, el propio concepto de TMY ya no tiene validez, pues al no encontrarse estabilizado el sistema climático, el cambio es continuo. En cualquier caso se podría definir TMY<sub>i</sub> asociado a cada año y que recoja la línea tendencial media de las previsiones previstas.

A estas dificultades debemos añadir la siguiente consideración:

Un TMY es un año meteorológico que representa las condiciones climáticas promedio del emplazamiento, pero que no se corresponde ni representa a ningún año concreto. Los años meteorológicos que experimentará cualquier sistema (edificio, centrales de generación, etc.) oscilarán alrededor del TMY a lo largo de toda su vida útil.

En este sentido, el sistema energético en su conjunto debe tener capacidad de responder a distintos años meteorológicos de forma satisfactoria, de tal forma que el análisis con un TMY u otro no dejan de ser más que un caso particular de los distintos años meteorológicos

**212** Realmente sería necesario emplear dos grupos de TMY, uno para el contexto BAU (que estaría más en línea con los escenarios A2 o B2), y otro para el contexto E3.0.

**213** Incluso en el caso de que la información requerida estuviera disponible, que no es el caso en España.

**214** En otros países como el Reino Unido sí que existen estos TMY oficiales asociados a distintos escenarios de cambio climático. Es importante que esta información se elabore en España, pues así tendríamos de referencias oficiales a la hora de acometer el análisis del efecto del cambio climático sobre diversos aspectos (disponibilidad de recursos, demanda energética de los edificios, etc.), de tal forma que los distintos análisis realizados podrían compararse entre ellos al tomar como partida un mismo TMY. Desafortunadamente, la situación en España se encuentra muy atrasada en este sentido: los únicos TMY oficiales que hay disponibles son los empleados para la certificación energética de edificios, y ni tan solo son TMY obtenidos a partir de las series históricas, habiendo sido generados de forma sintética ha empleando valores medios mensuales de las diversas variables.

a los que se puede ver sometida la instalación. La flexibilidad del sistema energético para adaptarse a distintas evoluciones de la demanda y la capacidad de generación constituye un importante atributo.

Dado que en este estudio, por cuestiones de volumen de trabajo, tan solo podemos acometer el análisis con un año<sup>215</sup> meteorológico, sin realizar el análisis de sensibilidad correspondiente a la variación del año meteorológico, y puesto que en España solo existe un TMY oficial por provincia<sup>216</sup>, vamos a emplear los TMY oficiales para desarrollar el análisis, considerándolos como representativos no ya de las condiciones climáticas medias pos cambio climático, pero sí de un año concreto al que se pueda ver sometido el sistema energético en condiciones pos cambio climático. Sin embargo, sí que reduciremos el producible hidroeléctrico en línea con los pronósticos de los modelos regionales de cambio climático para el escenario B2 del IPCC.

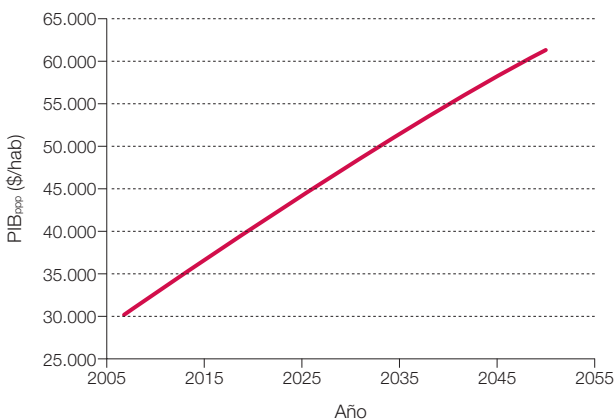
Sin embargo nos parece muy importante que desde el Ministerio de Medioambiente, a través de la AEMET, se proceda a actualizar la

información de los modelos climáticos regionales a los datos de los modelos globales correspondientes a la información más reciente del IPCC<sup>217</sup>, y se proporcione información horaria de las variables meteorológicas relevantes<sup>218</sup> para los estudios de integración de renovables en el sistema energético, en un formato adecuado<sup>219</sup> para su implementación en estudios de demanda energética de los edificios y de capacidad de generación de los sistemas de tecnologías renovables. Esta información debería hacerse disponible para distintos escenarios de emisiones, y tanto para los distintos años específicos, como para promedios estadísticamente representativos de periodos de por ejemplo 30 años<sup>220</sup>. Sin duda, la disponibilidad pública de esta información sería muy importante para las tareas de planificación y elaboración de escenarios que se desarrollen a partir de ahora.

### 3.4 Crecimiento económico

En la figura 52 recogemos el escenario de crecimiento económico hasta el año 2050 adoptado para este estudio. Este escenario

**Figura 52.** Escenario adoptado de crecimiento del PIB en el horizonte temporal considerado (\$ constantes).



- 215** Realmente un año meteorológico por provincia.
- 216** La aproximación correspondiente al clima actual que se ha implementado para el procedimiento de certificación energética de edificios.
- 217** Actualizándolo posteriormente, a medida de que se vaya disponiendo de nueva información de modelos globales con un desfase menor al actual.
- 218** Temperaturas seca y húmeda, humedad, irradiación solar total y directa, velocidad del viento, luminosidad.
- 219** El formato de archivo EPW es uno de los que está adoptando en la actualidad una mayor profusión.
- 220** Dada la gran variedad de modelos globales y regionales que se emplean para pronosticar la evolución del clima, estaría bien que se procesara dicha información para proporcionar una única serie temporal que se considerara estadísticamente representativa del conjunto de resultados disponibles, asignando distinto peso a los resultados de cada combinación de modelos de acuerdo con su fiabilidad. La disponibilidad de esta serie temporal única para cada escenario de emisiones, producida desde la administración, permitiría que fueran directamente comparables los resultados de los distintos estudios que se desarrollen, basándose en esta información.

es el correspondiente a realizar un ajuste exponencial del escenario de tasas de crecimiento económico planteado por (AIE, 2007) hasta el año 2030 y extrapolado por (EREC, GP, 2008) hasta el año 2050. Como podemos observar, el escenario responde a un planteamiento BAU en el que no se observan tendencias significativas a la contracción ni estabilización del PIB en el periodo analizado, lo que permite que el PIB per cápita prácticamente se doble desde el momento actual hasta el año 2050 (la TAE hasta 2050 es de 1,68%). De hecho, la extrapolación de este escenario exponencial de tasas de crecimiento anual del PIB conduce a la evolución del PIB mostrada en la figura 53, en la que el estancamiento del PIB tiene lugar en torno al año 2300 con valores del orden de los actualmente existentes en las economías de mayor PIB del mundo.

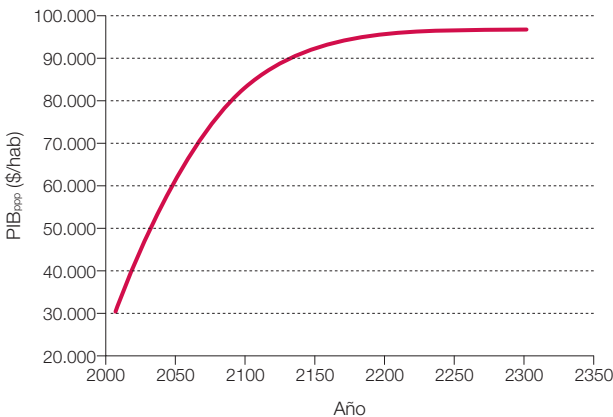
Para una discusión más detallada sobre los escenarios del PIB y los límites del crecimiento, remitimos al lector al punto 2.1 de este informe.

## 3.5 Población

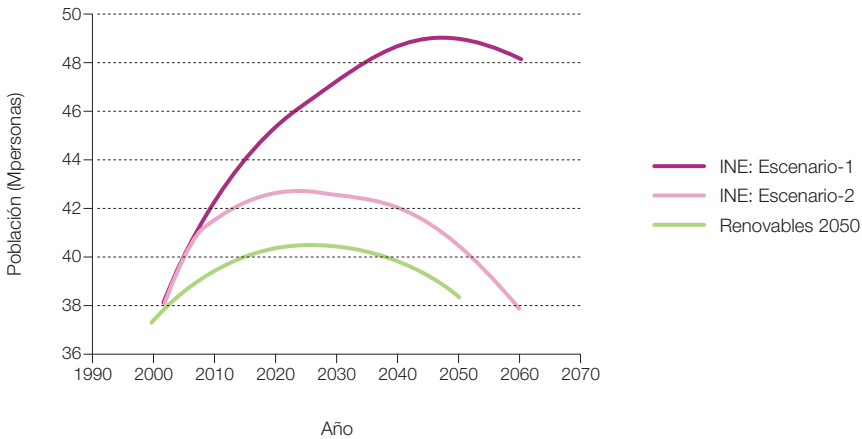
La población es otra variable importante para la elaboración de escenarios energéticos.

En España, el INE proporciona escenarios poblacionales que abarcan el periodo de análisis considerado en este estudio. Estos escenarios se van adaptando y se modifican de forma significativa con el paso del tiempo. A modo de ejemplo, en la figura 54 presentamos los dos escenarios poblacionales (escenario-1 y escenario-2), adaptados a la población peninsular, que proporciona actualmente (2009) el INE. En el mismo gráfico presentamos el escenario denominado "Renovables 2050", que es el que se adoptó en el informe (García-Casals, X., 2005), y que correspondía al escenario medio de los tres proporcionados por el INE en 2004, que era el que se consideraba como más probable en la referencia del INE, donde se presentaban estos escenarios. Como podemos observar, los dos escenarios actuales del INE proyectan poblaciones significativamente superiores a

**Figura 53.** Escenario adoptado de crecimiento del PIB, extendido más allá del límite temporal considerado en este estudio (año 2050) para apreciar su tendencia de contracción y saturación (\$ constantes).



**Figura 54.** Comparación de distintos escenarios de población para la España peninsular. Los Escenarios-1 y Escenario-2 son los dos escenarios actualmente (2009) disponibles en la web del INE. El escenario denominado “Renovables 2050” es el escenario medio y más probable que proporcionaba el INE en el año 2004, y que fue el adoptado para (García-Casals, X., 2005).



las del escenario del INE de 2004, lo cual debe ser un reflejo directo de las elevadas tasas de inmigración que experimentamos en los primeros años del siglo XXI. A pesar de estas mayores tasas de crecimiento, los escenarios actuales del INE siguen pronosticando un pico en la población peninsular, que para el caso del escenario-1 se alcanza en torno al año 2049, es decir, hacia el final del periodo de análisis que nosotros consideramos, mientras que para el escenario-2 se alcanza en torno al año 2023 (del mismo orden que en el escenario Renovables 2050).

Es importante resaltar que en los dos últimos años (2009 y 2010), y probablemente debido a la situación de crisis económica que atravesamos, las tasas de inmigración se han reducido muy significativamente, situación que cabe esperar se extienda a los próximos años. En estas condiciones es muy probable que los escenarios actualmente previstos por el INE se corrijan a la baja durante los próximos años, y se regrese a un escenario más

parecido al que empleamos en (García-Casals, X., 2005).

Sin embargo, para el desarrollo de este estudio hemos adoptado, al igual que en el caso del escenario del PIB, un posicionamiento conservador<sup>221</sup>, por lo que vamos a considerar el escenario-1 del INE como el escenario poblacional en el que basaremos el desarrollo de nuestros escenarios energéticos. La población de la España peninsular para el año 2050, será, según este escenario, de 48,85 Mhab.

### 3.6 Sector transporte

Recogemos en este punto los resultados del desarrollo de los escenarios BAU y E3.0 de demanda energética en el sector transporte hasta 2050.

El sector transporte tiene ya, en la actualidad, un gran peso en la demanda de energía en

<sup>221</sup> Conservador en el sentido de que una mayor población conduce a un mayor nivel de consumo energético, y por tanto requiere emplear una mayor cantidad de recursos renovables del potencial disponible.