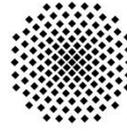




Centro Alemán de  
Aeronáutica y Astronáutica

Instituto de  
Termodinámica Técnica



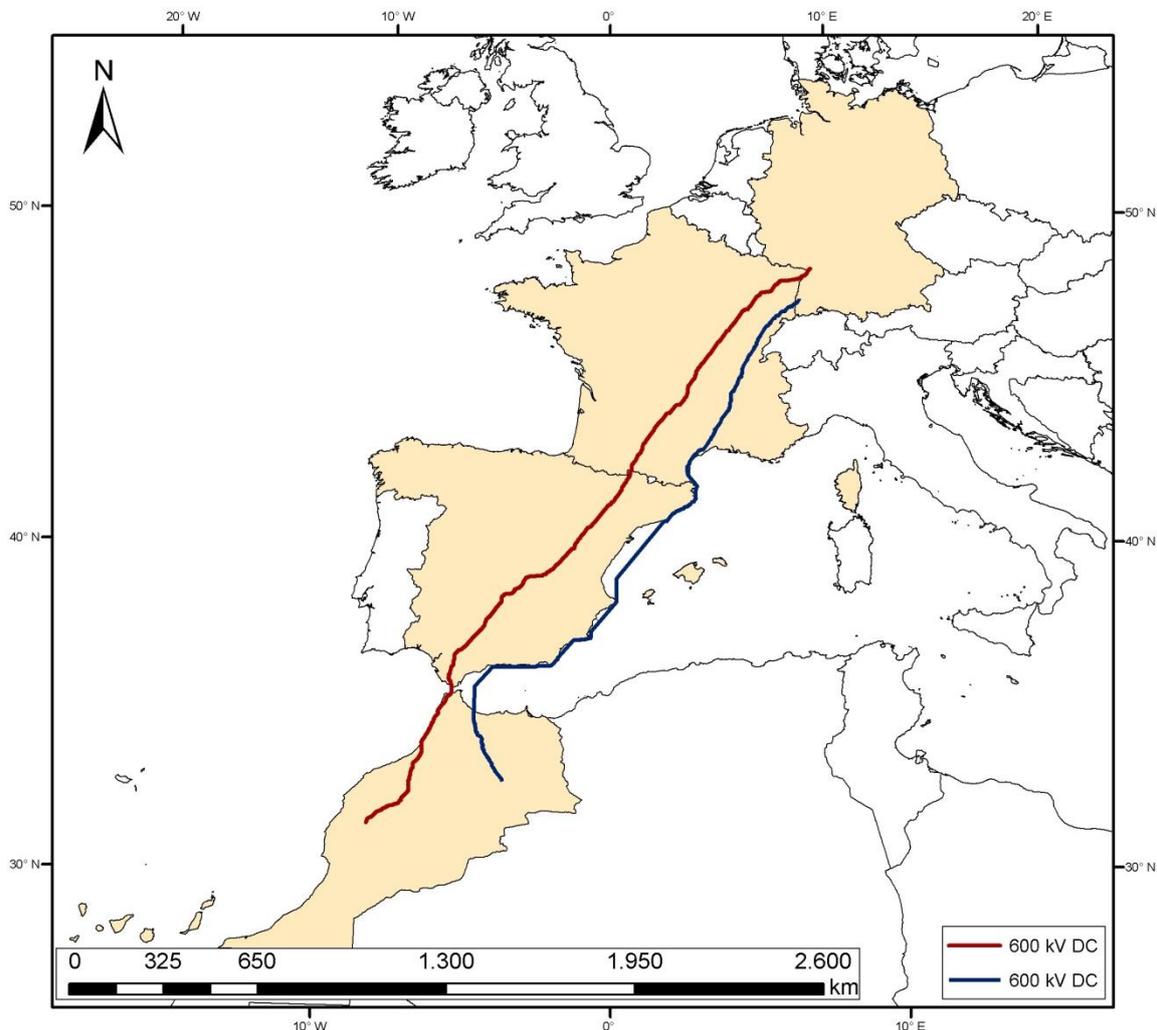
Universidad de Stuttgart

Facultades de  
Ingeniería Ambiental  
e Ingeniería Energética

## Transmisión de energía solar regulable desde África del Norte hacia Europa Central

Contenido: pasos del trabajo, resultados fundamentales y resumen

Autor: Denis Hess, Stuttgart a 1 de julio de 2013



– المسارات تربط الشعوب –

– Las vías comunican a las personas –

– Les chemins rapprochent les gens –

– Wege verbinden Menschen –

Traducción de:

Javier Fabo Lanuza  
Dr. Franz Trieb



## Pasos del trabajo

El estudio tiene por objetivo elaborar y discutir un modelo de la transmisión de corriente eléctrica proveniente de centrales solares térmicas desde Marruecos hacia Baden-Württemberg. Este objetivo será considerado integralmente en todos sus aspectos sociales, técnicos, económicos y ecológicos. También serán estudiadas las condiciones políticas bajo las cuales dicho objetivo resulta viable. La demanda de electricidad solar importada será analizada a partir del ejemplo del Estado miembro de Baden-Württemberg (BW) situado al sur de Alemania. Como posibilidad de importación de energías renovables se propone la corriente eléctrica procedente de centrales de vapor a partir de fuentes de energía solar térmica situadas en el norte de África. En lo referente a la transmisión de electricidad a larga distancia, será utilizada una línea de transmisión de corriente continua de alta tensión (*High-voltage direct current* - HVDC), que transportará la corriente eléctrica de manera eficiente y sin ocasionar pérdidas significativas. Un cálculo de los costes expone los gastos totales y el ahorro potencial frente a las fuentes de energía fósiles. En lo referente a la realización del proyecto, serán elucidados el procedimiento de la participación ciudadana y las estrategias de financiación. La Figura 1 muestra la estructura general de este trabajo.

Capítulo 1	¿En qué consisten las medidas políticas internacionales actuales relativas a la ER*?	Marco político internacional
Capítulo 2	¿Necesita BW una importación de corriente eléctrica renovable?	Demanda de Baden-Württemberg
Capítulo 3	¿De dónde procede la energía renovable?	Corriente eléctrica flexible y renovable proveniente de centrales de vapor a base de energía solar térmica en Marruecos
Capítulo 4	¿Cómo llega la energía eléctrica a BW?	HVDC – Línea de transmisión de corriente continua de alta tensión
Capítulo 5	¿Cuánto cuesta la importación?	Costes totales y ahorro potencial
Capítulo 6	¿Cómo resulta posible la realización de tal proyecto?	Financiación y participación ciudadana

Figura 1: Estructura del trabajo – desglose

\*ER: energía renovable

## Resultados fundamentales

1. Concepto de TRANS-CSP<sup>1</sup> original: El modelo descrito en el marco general del trabajo prevé la transmisión de corriente eléctrica flexible procedente de Marruecos según la demanda de Baden-Württemberg. La energía requerida será generada en una central de vapor a base de energía solar térmica especialmente construida para este propósito. La energía extraída será transmitida de punto a punto por medio de una línea de transmisión de corriente continua de alta tensión desde Marruecos hasta Baden-Württemberg. Ahí, la corriente eléctrica será suministrada a la red de corriente alterna en un punto nodal apropiado, con el objetivo de completar de manera óptima la oferta local de corriente eléctrica procedente de fuentes renovables nativas según la demanda local. Este planteamiento se atiene a los principios del estudio TRANS-CSP del Centro Alemán de Aeronáutica y Astronáutica (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - DLR*) del año 2006, el cual contiene la base académica para el desarrollo ulterior y mayor concretización de las interconexiones entre Europa y Africa del Norte. La exportación de corriente eléctrica renovable será efectuada bajo el requisito de que el abastecimiento de electricidad del país productor esté en todo caso asegurado independientemente del abastecimiento del país receptor. Ni la central térmica, ni las instalaciones destinadas a la exportación de la energía producida serán adicionalmente utilizadas para el aprovisionamiento propio del país productor, debido a posibles conflictos referentes a la utilización de las mismas que ello comporta. Desde el punto de vista del país destinatario, ello supondría un perjuicio para la flexibilidad y la calidad de la corriente eléctrica exportada.
2. Tecnología de la central termoeléctrica solar: Estando en disposición de centrales de energía solar térmica en Marruecos, equipadas con colectores solares parabólicos, así como con un acumulador de energía térmica a base de sal fluida, se precisa de una potencia de unos 2200 MW en Marruecos para conseguir un rendimiento neto máximo de 1500 MW en el punto de suministro en Alemania. Un aprovechamiento medio de aproximadamente 6200 horas equivalentes de rendimiento a plena potencia proporciona un aprovisionamiento anual de energía solar de en torno a 9 millardos de kWh, el cual completaría la composición energética nativa en Baden-Württemberg con corriente solar regulable, tal y como si proviniera de una central fósil convencional. La cantidad de energía procedente del norte de África importada durante un tiempo operativo de 40 años asciende a 360 millardos de kWh. Las centrales solares equipadas con torres de refrigeración seca no consumen agua local en el desierto. En lugar de ella, una parte del aprovisionamiento de agua para las centrales, procedente de agua marina desalada en

---

<sup>1</sup> Trans-Mediterranean interconnection for Concentrating Solar Power

la costa, permanecería a disposición del desarrollo regional del lugar, así como del aprovisionamiento de los hasta 2500 puestos de trabajo requeridos. La inversión total es de 14-16 millardos de €, respecto de la cual las centrales solares se comprometen a aportar un 80%.

3. Línea de transmisión de corriente continua de alta tensión: Los cables de tierra son más caros que las líneas aéreas, pero precisan, por el contrario, de menores gastos de compensación, debido a su escaso requerimiento de superficie (véase Punto 9). Ambas opciones de transmisión comportan por tanto costes parecidos. El trazado HVDC con  $\pm 600$  kV de punto de máxima potencia y un punto de máximo rendimiento de 1700 MW requiere en torno al 20 % de la inversión total de 14-16 millardos de € aprox. La tecnología VSC (*Voltage-Source-Converter*) escogida posibilita también, junto a la transmisión de energía solar regulable, servicios de sistemas como, por ejemplo, el restablecimiento de la red después de una falla (*Blackstart*) y la capacidad del convertidor de potencia reactiva (*Reactive Power*).
4. Cooperación internacional para la protección del medio ambiente: La realización de una infraestructura tanto para la importación como para la exportación de la energía solar regulable de alta calidad (primero desde Marruecos hacia Alemania a través de España y Francia, más a delante, sin embargo, susceptible de ser ampliada también a otros países colaboradores) puede contribuir a la formación de una comunidad internacional de países constituida en torno a la protección del clima, la energía y los recursos, así como en torno a fines políticos comunes.
5. Viraje energético (*Energiewende*) en Baden-Württemberg: La energía solar regulable procedente de las centrales solares térmicas en Marruecos ofrece la posibilidad de ser ajustada de manera óptima a la mezcla energética nativa de Baden-Württemberg, que se compone en su mayoría de fuentes de energía fluctuante, como electricidad fotovoltaica, eólica e centrales hidroeléctricas de agua corriente. Ello hace posible un perfecto ajustamiento de la oferta y la demanda de la corriente eléctrica. Para el caso que es aquí objeto de consideración, el cual debe alcanzar a largo plazo altos niveles de aporte energético renovable para el abastecimiento de corriente eléctrica, pudo ser demostrado que la importación de energía solar regulable conduce a una reducción sustancial de la necesidad de nueva infraestructura técnica, la cual es requerida para el abastecimiento a partir de energías renovables. Haciendo uso de ésta opción, serán requeridas un total sustancialmente menor de centrales fósiles y renovables, acumuladores de corriente eléctrica y redes para completar el viraje energético.

6. Ya es hora de actuar: La preparación, la planificación y la construcción de un proyecto semejante exigirán por lo menos 10-15 años hasta que la primera corriente eléctrica pueda fluir hacia Alemania. La realización de dicho proyecto no resultaría factible hasta 2025, siempre y cuando la decisión política favorable al mismo sea tomada durante el presente año (2013) o durante el siguiente (2014) y fuera puesta en marcha su realización inmediatamente. Mientras el inicio se demora, la disponibilidad de esta opción será aplazada a un correspondiente espacio de tiempo en el futuro.
7. Elevada inversión pero bajos y estables costes de operación: La inversión de las diferentes variantes del proyecto se estima entre 14 a 16 millardos de €. Sin embargo, tras la devolución del crédito correspondiente, los costes de mantenimiento de la energía solar se estiman en tan sólo 4 - 5 cénts. de €/kWh. Ello propicia la devolución a corto plazo de los créditos a los inversores, teniendo en cuenta que este procedimiento reduce también el riesgo de inversión, así como el interés requerido. Dado que a un crédito de corta duración corresponden altas tasas de devolución de pagos, es importante repartir dichos costes entre tantos usuarios como sea posible. En el caso extremo de producirse una devolución total del importe de la inversión con intereses incluidos dentro de un sólo año de funcionamiento por parte de todos los usuarios alemanes, dichos usuarios deberían aceptar una subida adicional del precio de la electricidad de 3 cénts. de €/kWh en dicho año, que les sería requerida, por ejemplo, a modo de contribución. Gracias a ello resultará posible disfrutar de precios más bajos y estables en la corriente eléctrica importada desde el norte de África a partir del año siguiente y a lo largo de los 40 años subsiguientes en los que se estima el tiempo de funcionamiento operativo del dispositivo.
8. Seguridad financiera y continuidad de rendimiento: Existe el riesgo de que el aprovechamiento de las centrales de energía solar importada se vea progresivamente reducido, cuando la producción creciente de fuentes eólicas y fotovoltaicas sature el mercado local en Baden-Württemberg. De ahí que las compañías de centrales del gas y carbón convencionales promuevan ya hoy contratos de compra de energía a largo plazo garantizados estatalmente, para poder mantener de forma segura el rendimiento de sus centrales. Sin embargo, el rendimiento de las energías fósiles es exactamente lo que la *Energiewende* está por reducir. Mientras el beneficio de las centrales fósiles deba ser adaptado a los precios fluctuantes del combustible internacional y su función como copia de seguridad se vuelva con ello cada vez más cara, la importación de energía solar tendrá dos ventajas frente a ella: en primer lugar, los costes de la energía solar permanecen estables a largo plazo, ya que se basan en gran medida en costes de capital y mano de obra; en segundo lugar, el aprovechamiento de la central solar térmica no necesita ser sucesivamente reducido, ya que está ya en disposición de suministrar

corriente eléctrica renovable. De ahí la importancia de integrar la corriente eléctrica procedente de energía solar regulable en el aporte de energía local nativa.

9. Compensación proporcionada por la superficie requerida: La población colindante a la central en Marruecos y al trazado eléctrico de transmisión continua de alta tensión de los cuatro países involucrados recibirá cada año pagos compensatorios por la superficie requerida por la infraestructura total. De esta manera, los ciudadanos y comunidades involucradas participarán en el proyecto financieramente de manera duradera. Los pagos compensatorios en Marruecos de hasta 76 millones de € al año se mantendrán en la misma dimensión que los actuales ingresos de la cooperación internacional alemana en este país.
  
10. Estructura cooperativa del proyecto: Una estructura cooperativa del proyecto debe asegurar el marco para una realización del proyecto ciudadano con legitimación democrática a nivel comunitario. Los afectados de manera duradera devienen, así, participantes de manera duradera e incluso, dado el caso, promotores de proyecto. Surge así una asociación de varias naciones a nivel comunitario que, a través del trabajo político, puede llegar a ser apoyada a nivel gubernamental. De este modo, la línea eléctrica que, en primer lugar, transportará electricidad solar de Marruecos a Alemania, podrá reunir, en segundo lugar, las comunidades de los cuatro países participantes de modo financiero y cultural.

## Resumen

### Fines políticos - Capítulo 1

La escasez creciente de materias primas a escala mundial a causa de la demanda creciente de energía dispara los costes de la energía y agudiza los conflictos en torno a los recursos. En contraposición a fuentes energéticas fósiles, las energías renovables ofrecen la oportunidad de un consumo sostenible a escala mundial y permiten un desarrollo económico, ambiental y social beneficioso para la salud y el bienestar de las generaciones presentes y futuras. La degradación ambiental, la distribución desigual de los recursos y la inestabilidad política pueden ser evitadas en favor de la paz social.

Un trazado eléctrico como el que se describe en el modelo de estudio, que se extiende a lo largo de cuatro países, constituye un ejemplo de cooperación internacional para el fomento de las energías renovables. Una cooperación igualitaria y ejercida en igualdad de condiciones ofrece la posibilidad de alcanzar fines comunes de forma exitosa y sostenible, relativos a la realización de una política energética, a la protección del medio ambiente y a la optimización de los recursos de una población mundial creciente.

### Necesidad de energía renovable y a la vez regulable – Capítulo 2

A consecuencia de la catástrofe del reactor nuclear en Japón en Marzo de 2011, el cambio hacia un sistema energético seguro, rentable y compatible respetuoso, sostenible con el medio ambiente fue decidido en Alemania con la aprobación de todos los partidos políticos. Desde entonces, la política se sitúa ante el desafío de desarrollar una estrategia de suministro de energía sostenible. Para lograr el objetivo de una producción de electricidad proveniente casi por completo de fuentes de energía renovables debemos apostar hoy por las energías renovables, proyectando y siguiendo **fines estratégicos** concretos y apropiados. Una corrección ulterior supondría altos riesgos de inversión. Un peligro reside, por ejemplo, en la minimización del aprovechamiento de las capacidades regulables de las centrales eléctricas. Esto puede ocurrir debido a la construcción de grandes capacidades de energía fluctuante como p. e. eólica y fotovoltaica. Las capacidades regulables producirían entonces beneficios demasiado escasos como para continuar permaneciendo en la red.

Debido al cierre de las centrales nucleares alemanas en 2011 se ha producido un déficit de suministro de energía en el sur de Alemania, el cual es compensado en ese momento a base de importaciones. De ahí la necesidad de analizar cómo la energía renovable puede garantizar en el futuro un suministro de electricidad fiable en Baden-Württemberg.

Dos escenarios muestran la ampliación de hasta el 95% de la cuota de energías renovables en el año 2050 en Baden-Württemberg: Éstos se diferencian en la combinación de soportes energéticos, en los dispositivos de red y de acumulación de energía, así como en la capacidad de aprovechamiento total del parque de generación de electricidad (ver Figura 2). La decisión relativa a la composición del parque de generación eléctrica con el objetivo de proporcionar un suministro completo de energía renovable está todavía **hoy** en día por determinar, ya que es preciso tener en cuenta el largo tiempo de construcción y la rentabilidad de las inversiones.

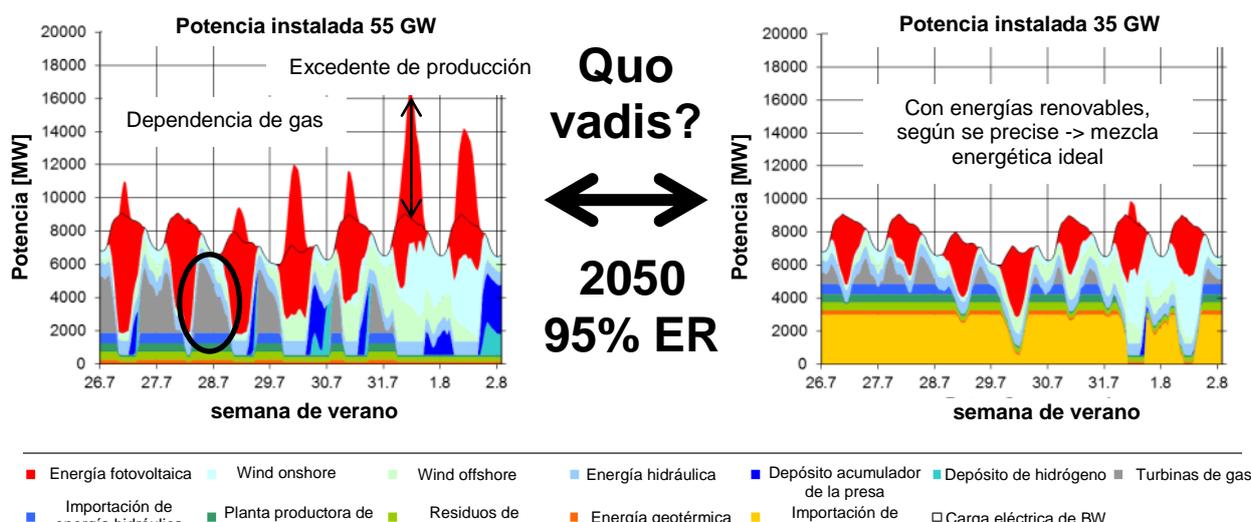


Figura 2: Extracto a partir de un análisis cronológico de dos escenarios en 2050, con un porcentaje respectivamente del 95% de las energías renovables, referentes al suministro de electricidad en Baden-Württemberg.

Los escenarios se diferencian principalmente por la importación de energía renovable regulable a partir de centrales de energía solar térmica en el norte de África. Como es sabido, el problema central de la energía renovable nativa es la discrepancia existente entre la oferta y la demanda energéticas que resulta de la disponibilidad restringida de la energía, en tanto que dependiente de condiciones climáticas y meteorológicas contingentes. En el escenario correspondiente a la Figura 2 (izquierda) el objetivo es disponer, con la ayuda de acumuladores, de los excedentes energéticos procedentes de los períodos de alta oferta energética local renovable en momentos en que las fuentes de energía renovables no son capaces de satisfacer la demanda. En el escenario correspondiente a la Figura 2 (derecha), sin embargo, el uso de excedentes es evitado mediante el uso de fuentes de energía renovable y a la vez regulables, como p. e. la electricidad solar procedente de Marruecos. El resultado es una reducción de la potencia total requerida, así como de la necesidad de almacenamiento y transmisión de corriente eléctrica adicional. A falta de la importación regulable de energía renovable surge una momentánea, pero ciertamente alta, sobrecarga

de la red, los acumuladores y las centrales de reserva, a causa de las fluctuaciones de energías locales renovables. Esta amenaza (en realidad innecesaria) conduce a una ampliación de las redes, la capacidad de almacenamiento, así como de las turbinas de gas de las centrales de reserva. Además, surge también una dependencia significativa (y de suyo evitable) de las centrales eléctricas de turbinas de gas en momentos de baja oferta local de energía renovable. Las importaciones de energía renovable regulable permiten que los inconvenientes producidos por la fluctuación sean minimizados y que los excedentes sean nivelados. La viabilidad de una transición a larga distancia de energía solar regulable a partir de centrales solares térmicas debe ser por ello estudiada en detalle, para mostrar los potenciales obstáculos y obtener las posibles soluciones correspondientes. El potencial solar térmico más próximo a Europa se encuentra en el desierto situado al norte de África. La energía solar térmica se encuentra disponible ahí de manera abundante y con una calidad muy alta, ya que se mantiene constante durante casi todo el año. Tanto la tecnología como el conocimiento técnico necesarios para la realización de una transmisión eléctrica a larga distancia se encuentran disponibles en el mercado y ya han sido aplicados en muchos proyectos a nivel mundial.

### **Centrales solares térmicas – Capítulo 3**

Sinopsis y breve descripción del dispositivo técnico de transmisión a larga distancia de la energía solar regulable desde el norte de África hacia Europa central (véase Figura 3).

Las centrales solares térmicas (ingl. *Concentrating Solar Power – CSP*) son centrales cuyo funcionamiento está basado en el potencial energético del vapor, capaces de utilizar la luz solar directa como fuente de energía, por medio de colectores solares concentradores. Esto es lo que se conoce como “irradiación normal directa” (ingl. *Direct Normal Irradiance – DNI*). En el ejemplo tomado como referencia, el colector con espejo parabólico, la DNI es concentrada hasta calentar un líquido térmico a una temperatura de 390°C. El acumulador de energía térmica de la central y el generador de vapor de la turbina son alimentados con este calor. De este modo, el acumulador de calor ofrece una fuente de energía flexible para la generación de electricidad según sea requerida, incluso de noche. En caso de necesidad, existe la posibilidad opcional de utilizar todo tipo de combustibles (que son energía térmica almacenada en forma casi ideal) para la combustión. De este modo, una central termoeléctrica solar está en condiciones de ofrecer un rendimiento asegurado, garantizando corriente eléctrica a plena capacidad en cualquier momento según sea necesario. La turbina acciona un generador mecánicamente que produce corriente alterna (ingl. *Alternating Current – AC*).

Una transmisión de electricidad a larga distancia y sin embargo baja en pérdidas resulta posible usando la tecnología de corriente continua de alta tensión (ingl. *High Voltage Direct Current* - HVDC) con la ayuda de convertidores AC-DC, así como de cables subterráneos o líneas aéreas que se extienden hasta el lugar de transmisión. Una vez ahí, se produce nuevamente corriente alterna (AC) a partir de corriente continua (ingl. *Direct Current* – DC), que es almacenada y distribuida en la red de corriente alterna, a través de un punto nodal de la red apropiado – normalmente un centro de alta demanda.

El parque de la central solar térmica será instalado con un rendimiento bruto de unos 2200 MW, para conseguir una importación de 1500 MW en el punto de alimentación en Alemania. Con un aprovechamiento medio de 6200 horas al año fluirían a Alemania en torno a 9.3 millones de kWh de electricidad solar al año, cubriendo con ello aprox. un 1.5% del suministro eléctrico de Alemania. Esto no significaría una excesiva dependencia de las importaciones. Mediante la introducción de fuentes de energía renovables y a la vez flexibles en el sistema de aprovisionamiento energético se alcanza una mayor flexibilidad e independencia, a la vez que se completa el aporte energético de las centrales nativas mediante fuentes de energía renovables dotadas de propiedades complementarias.

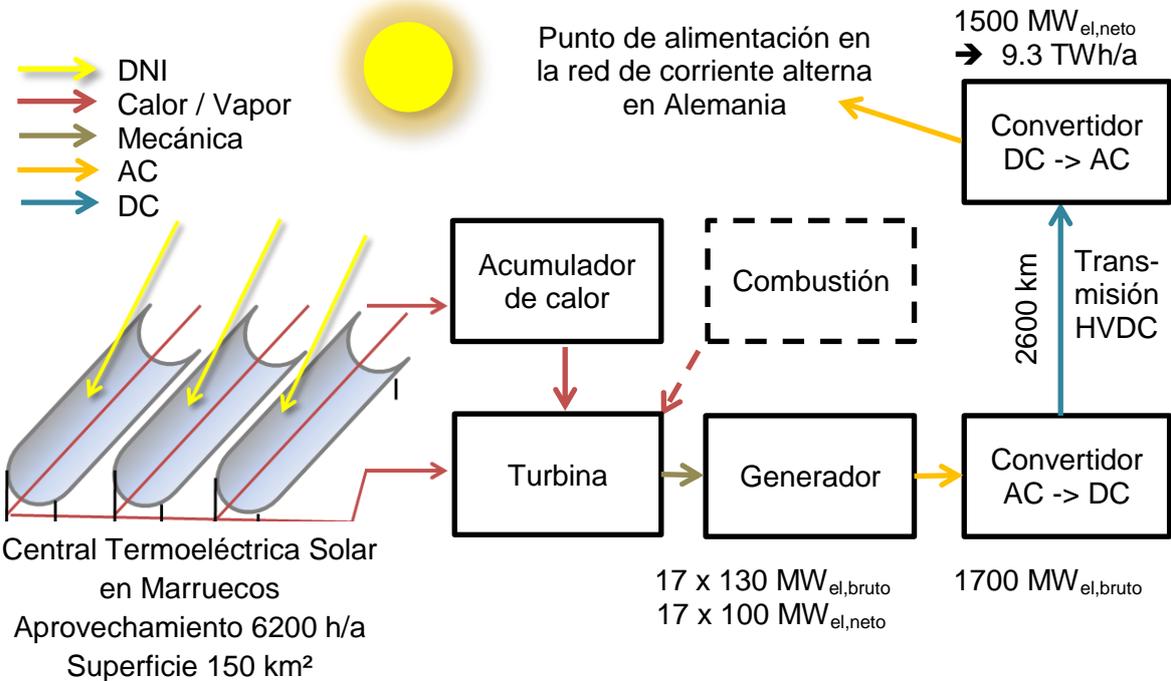


Figura 3: Dispositivo CSP-HVDC para la transmisión de energía solar regulable a larga distancia

Las pérdidas totales de la central de energía solar térmica con la línea de trazado eléctrico ascienden a un 30% aprox. Un 23% (de ese porcentaje) es consumido por la central misma y puede ser reducido mediante optimizaciones.

Para los componentes técnicos del dispositivo CSP-HVDC serán requeridos sobre todo acero y vidrio, los cuales son fácilmente reciclables. Las centrales solares dotadas de ventilación seca precisan poca agua. Las centrales no consumirán agua necesaria para la vida de la población local, sino tan sólo una parte de su demanda de agua, obtenida a partir de agua de mar desalada para el desarrollo regional del lugar y para el provisionamiento de hasta los 2500 puestos de trabajo necesarios que estarán a disposición de la población nativa. Ello requiere tan sólo una fracción marginal del rendimiento de los parques de las centrales solares térmicas.

#### **Líneas de transmisión de corriente de alta tensión - Capítulo 4**

Para la transmisión de electricidad a larga distancia se requiere un trazado eléctrico de corriente continua. Éste dispone de una tensión nominal de  $\pm 600$  kV y una potencia nominal de aproximadamente 1700 MW, de un trazado cuyo recorrido está sujeto a dos posibles alternativas, así como de dos modalidades tecnológicas diferentes de realización, con cables subterráneos y con líneas aéreas. Los cables subterráneos son más costosos, si bien requieren pagos compensatorios sustancialmente menores que las líneas aéreas, debido a la reducida superficie que requiere su instalación (véase costes, Capítulo 5). Esta circunstancia propicia una neutralización de los costes respectivos relativos a ambas opciones de transmisión y ofrece la posibilidad de una libre elección relativa a la tecnología y a la ruta del trazado de transmisión.

Ambos trazados atraviesan el ámbito urbano de Marruecos, España, Francia y Alemania, esto es: la zona exclusivamente económica (ZEE) de dichos países. El algoritmo utilizado para el cálculo de los trazados alternativos se basa en un estudio las rutas óptimas entre los puntos de partida y de llegada respectivos de los mismos. Dicho estudio se atiene a su vez a criterios económicos y de exclusión, definidos sobre la base de factores económicos, ambientales y sociales. La línea roja de la Figura 4 muestra una variante del trazado que se extiende principalmente por tierra, a partir de Marrakech (Marruecos). Ésta cruza el estrecho de Gibraltar, España, los Pirineos y Francia hasta alcanzar tras 2600 km su destino en Daxlanden, en las proximidades de Karlsruhe en el estado de Baden-Württemberg, Alemania.

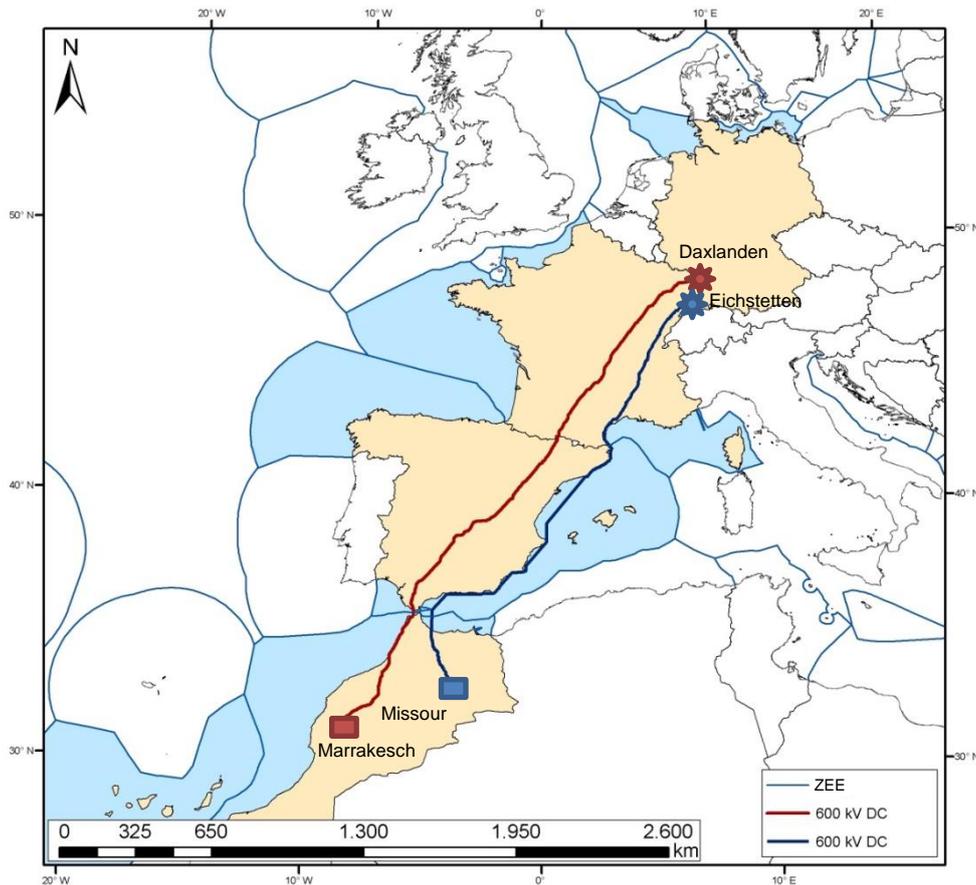


Figura 4: Modelo de dos trazados alternativos, a modo de ejemplo

La línea azul se extiende principalmente por mar, evitando así el cruce de los Pirineos. Desde su punto de partida en Missouri, esta alternativa de trazado cruza el Alto Atlas para desembocar, tras varios cientos de kilómetros, en el Mediterráneo. Para evitar las zonas de aguas profundas, ésta se extiende a lo largo de la costa española hasta alcanzar Francia. El trazado termina en Eichstetten, en las proximidades de Freiburg im Breisgau, con 2300 km de longitud.

La tecnología VSC (*Voltage-Source-Converter*) escogida posibilita también, junto a la transmisión de energía solar regulable, servicios de sistemas como, por ejemplo, el restablecimiento de la red después de un fallo (*Blackstart*) y la capacidad del convertidor de potencia reactiva (*Reactive Power*).

### **Costes - Capítulo 5**

Los costes de inversión de las diferentes variantes del proyecto asciende a un total de 14-16 millardos de € aprox. El porcentaje correspondiente al CSP es del 70-90% aprox. mientras que el de HVDC es del 10-30%. En comparación con los combustibles fósiles regulables, el parque de energía solar térmica en Marruecos proporciona un ahorro económico de hasta 3.8 millardos de €, durante la vida útil de la misma, que se estima en 40 años. El ahorro es

altamente dependiente de la tasa de descuento, la cual fue determinada en un 1.3% anual a modo de ejemplo. Los costos acumulados de las indemnizaciones y los costes de inversión (correspondientes a las barras azules y verdes de la Figura 5 respectivamente) de las variantes de trazado correspondientes difieren al final del período de explotación sólo marginalmente. En este punto interviene la neutralidad arriba mencionada entre los costes de los cables subterráneos y las líneas aéreas.

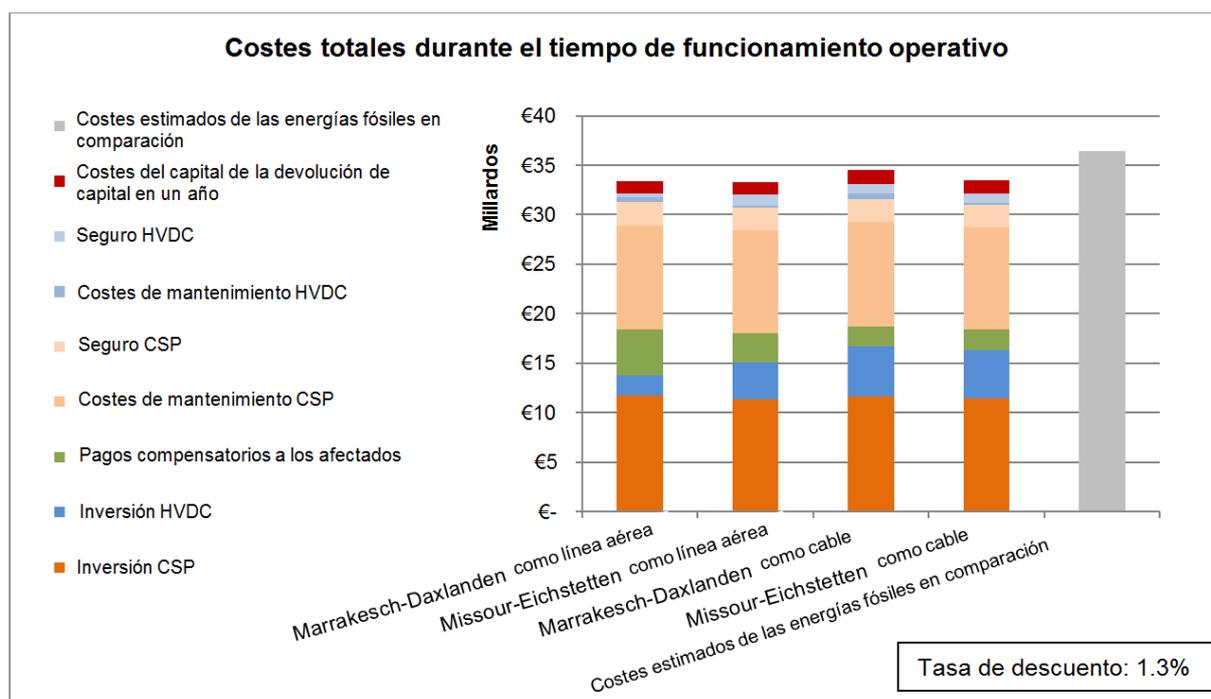


Figura 5: Costes totales durante los 40 años correspondientes al tiempo de funcionamiento operativo con una producción de 360 TWh aprox.

El coste total durante la vida útil del dispositivo CSP-HVDC (*Levelized Cost Of Electricity - LCOE*) ronda en torno a los 12 cént. de € / kWh aprox. Esto incluye la operación y el mantenimiento de la planta, con un coste de unos 4-5 cént. de € / kWh aprox. Por su parte, el porcentaje de los gastos de personal asciende en razón de un 2% anual.

Los costes totales del LCOE de ~ 12 céntimos de € / kWh sólo serán alcanzados mientras los costes de capital se mantengan bajos. Esto se alcanza a través de una minimización del riesgo de la inversión, lo cual puede lograrse mediante un contrato de compra de la corriente eléctrica garantizada por parte del Estado y la rápida amortización del capital dentro de un año.

Incluso cuando la amortización de capital se realiza en un corto periodo de tiempo, lo cual supone una elevada tarifa eléctrica durante el mismo (véase Figura 6), se obtiene después un beneficio en forma de costes de mantenimiento más bajos y estables a largo plazo. En el modelo que es objeto de consideración podrían surgir costes de capital de 1.2 millardos de

€, correspondientes a un año de amortización de capital (barra roja de la Figura 5) o de hasta 36 millardos de €, a partir de 40 años de amortización de capital. En el último caso (línea punteada de la Figura 6) la tarifa eléctrica no se situaría en ningún instante por debajo de los costes correspondientes a las energías variables fósiles (línea roja de la Figura 6). Una tasa inicial elevada conduce a costes bajos a largo plazo, mientras que una tasa inicial más baja trae consigo altos costes a largo plazo. Esto es así bajo el presupuesto de que se parte de un mercado imperfecto, en el que la tasa de descuento del 1.3% anual es significativamente inferior a la tasa del proyecto del 9.9% anual.

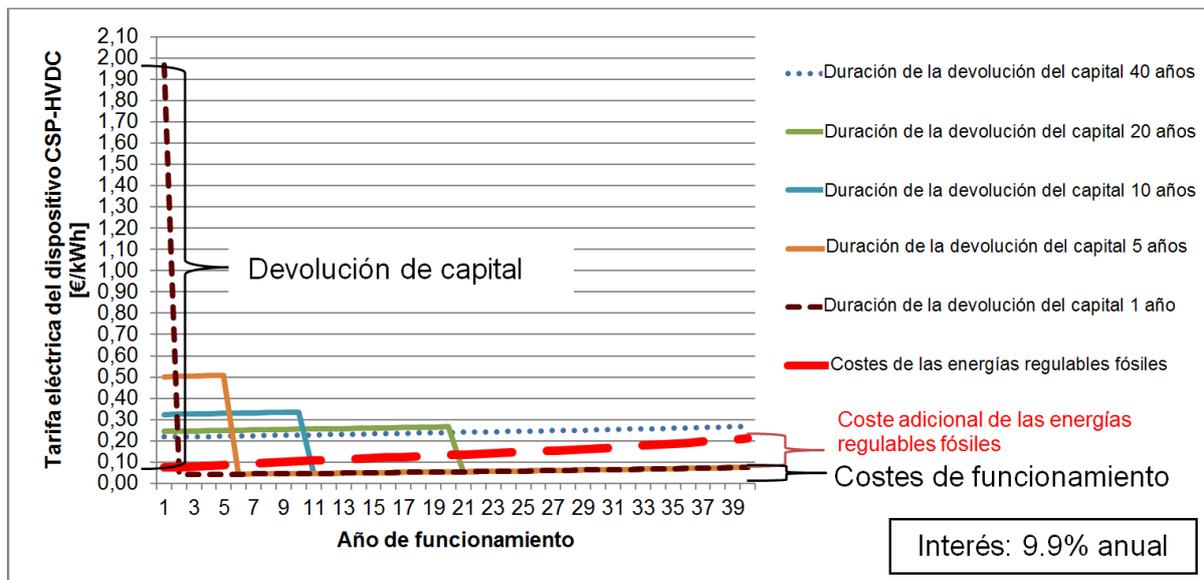


Figura 6: Tarifa del dispositivo CSP-HVDC a pagar en dependencia al tiempo de amortización del capital invertido correspondiente al año de funcionamiento (Trazado Missouri-Eichstetten en la variable de cable subterráneo).

### **Realización: Contratos, participación ciudadana y duración del proyecto – Capítulo 6**

La solución del problema de una alta tarifa a corto plazo consiste en una asignación de los costes al mayor número de usuarios posibles. La política podría acordar la compensación de la electricidad con un contrato de compra de electricidad por parte del Estado temporalmente limitado, a través de una normativa a nivel europeo. De este modo, en el caso de una devolución de capital en el plazo de un año, se produciría, por ejemplo, en el área de servicio de la ENTSO-E, un gasto adicional de 0.5 cént. de € por cada kWh. En el segundo año esta tasa se suprime, ya que la devolución desaparece. A partir de entonces tan sólo quedan los costes de mantenimiento. El beneficio en un mercado europeo de la electricidad surge para todos los usuarios de electricidad a través de menores costos de mantenimiento, en comparación con los correspondientes a los combustibles fósiles. En el caso de que la compensación fuera aplicada sólo a Alemania, la remuneración sería de

unos 3 cént. de € / kWh durante el primer año. Tras ello, la inversión de capital estaría completamente amortizada, intereses incluidos.

Una vez devuelta la inversión a los inversores, intereses inclusive, la propiedad (la central y el trazado) pasa a formar parte de una cooperativa, cuyos socios serían las ciudadanas y ciudadanos afectados (residentes en las proximidades del dispositivo CSP-HVDC), comunidades y usuarios. Un proyecto de participación ciudadana semejante, provisto de legitimación democrática en el ámbito comunitario, hace valer la exigencia fundamental de una sociedad moderna, en la que todos sus integrantes son considerados en igualdad de condiciones.

Puesto que, según se establece a lo largo del modelo, las cargas económicas de la infraestructura corren a cargo de los usuarios involucrados, los pagos compensatorios serán cargados también a cuenta de los usuarios de los países de tránsito afectados. A través de este pago compensatorio (véase Tabla 1) aplicado a las personas y comunidades situadas a lo largo del dispositivo, resulta posible un ingreso adicional sostenible. Una medida de compensación de una amplitud semejante no se había dado nunca antes en la historia del aprovisionamiento energético. Ésta convierte en participantes a los afectados de manera duradera. Una vez transcurridos 40 años, el coste total de las variantes del trazado apenas difiere entre sí, a pesar de la elección tecnológica escogida entre cables subterráneos, cables submarinos o líneas aéreas. Aquí reside una buena posibilidad adicional de participación para los afectados, referente a la realización técnica del proyecto. Sólo mediante el acuerdo común de todas las partes resulta posible realizar un proyecto como éste. En último término, el trazado debe unir cooperativamente a Estados y personas tanto a nivel internacional como local.

En una sociedad, en la que afectados, consumidores e inversores se benefician conjuntamente resulta posible realizar un proyecto como éste con confianza. Transparencia y calidad son criterios importantes para la aceptabilidad y la minimización de los costes, tanto en el proceso de toma de decisiones, como durante la construcción.

Tabla 1: Beneficio directo de los estados participantes y afectados por el dispositivo CSP-HVDC

<b>Beneficio anual</b>	<b>Marruecos</b>	<b>España</b>	<b>Francia</b>	<b>Alemania</b>
Pagos compensatorios*	60 - 77 millones de €	2,6 - 40 millones de €	1,3 - 30 millones de €	~0 - 1,3 millones de €
-> esto es: un beneficio	~ 40 €Cent/m <sup>2</sup>			
Intereses del capital invertido	9.9% p.a.			
Puestos de trabajo necesarios para el funcionamiento*	1700 – 2500	0 - 30	20 – 30	1 - 3

\*Valores sujetos a variaciones que dependen tanto de la variante de trazado como del tipo de transmisión (cable subterráneo o línea aérea). El beneficio anual (propietarios e arrendatarios) correspondiente a los terrenos agrícolas en BW es de 8 cént. €/m<sup>2</sup> (fuente: Landwirtschaftliche Betriebsverhältnisse und Buchführungsergebnisse 2012).

Para que la corriente eléctrica pueda fluir a partir del año 2025 y la transferencia de energía pueda unir continentes y sociedades, resulta preciso comenzar con la realización del proyecto inmediatamente sin más dilación. El modelo en forma de semáforo de la Figura 7 muestra el procedimiento y la duración del proceso de decisión de las ciudadanas y ciudadanos involucrados.

La idea fundamental reside en la democratización de la estructura de votación en diferentes niveles, partiendo de las ciudadanas y ciudadanos hasta el nivel político regional y suprarregional, pasando por los afectados a causa del lugar de emplazamiento de las instalaciones. Así es como una decisión a favor del proyecto y la realización concreta del mismo puede ser llevada a cabo a nivel de una democracia participativa y representativa. En un proyecto tan amplio y espacialmente diversificado las tecnologías modernas de la información, como las redes sociales, pueden desempeñar un papel en la difusión de la información, la de formación de la opinión, y el intercambio argumentativo, así como en la preparación de un congreso interactivo de decisiones.

En este momento, la publicación del proyecto a través de los medios de comunicación y la declaración política de intenciones en el ámbito público se encuentra en la fase roja. Ahí se decide si el proyecto se lleva o no a realización. En la fase amarilla del proyecto, las ciudadanas y ciudadanos interesados pueden contribuir a la realización del proyecto a través de la deliberación (decisión consultiva) y la democracia participativa con soluciones alternativas, sobre todo con la intención de evitar conflictos futuros y decidir sobre la forma de realización. La consecución de un acuerdo y una planificación del proyecto aceptables a este nivel da lugar a la fase verde del semáforo: la realización efectiva. Aquí se alcanza la seguridad jurídica para los inversores y los promotores del proyecto. Durante la ejecución del proyecto será garantizada la información evaluativa a los afectados a modo de posibilidad de control para evaluar el proyecto total. Por último, los proyectos futuros se pueden beneficiar de ello.

## Cronograma

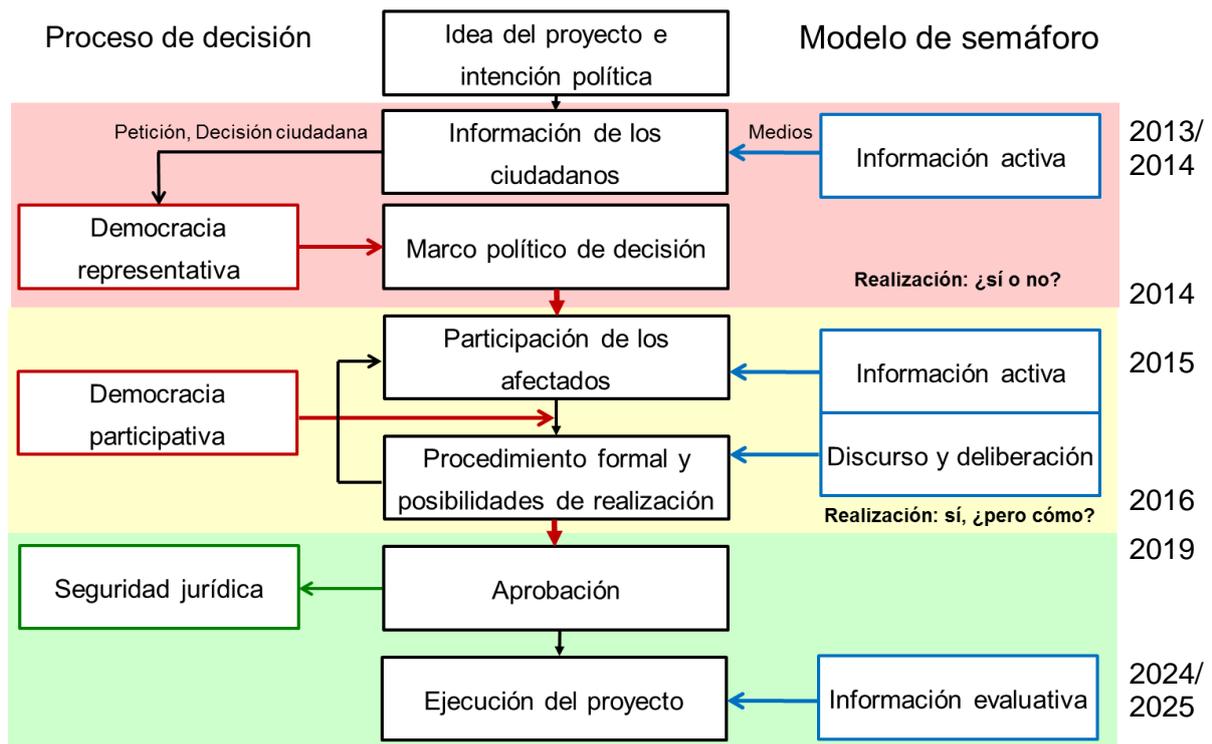


Figura 7: Modelo en forma de semáforo en el que se representan las fases del proceso de decisión

La unión a lo largo de un trazado de alta tensión de energía renovable regulable constituye un signo palpable del progreso frente a la dependencia respecto de las energías fósiles. Ésta marca el comienzo de un trabajo cooperativo, innovador, plural e igualitario en nuestra política energética.

La hoja informativa que contiene la Tabla 2 muestra los datos principales a modo de panorámica general.

Hoja informativa: Línea de transmisión de energía solar regulable por variante

Tabla 2: Visión de conjunto (valor del dinero real en el año 2010)

Política	Panorámica geográfica de ambas variantes	
	Estados	Marruecos, España, Francia, Alemania
Técnica	Lóngitud del trazado	2300 – 2600 km
	Modo de transmisión	Línea de transmisión de corriente continua de alta tensión Conexión de punto a punto
	Rendimiento bruto de la transmisión	1700 MW
	Rendimiento neto de la transmisión	1500 MW
	Número de cables conductores	3 (+ Pol; - Pol; hilo, línea conductora adicional de seguridad)
	Tipo de central	Central de energía solar térmica con colectores solares parabólicos y acumulador de calor
	Capacidad bruta de la central	17 x 130 MW -> 2200 MW
	Capacidad neta de la central	17 x 100 MW -> 1700 MW
	Pérdidas totales	30%
	Cantidad de energía renovable disponible	9.32 TWh/a -0.2% p.a.
Tiempo de funcionamiento operativo mínimo	40 años	
Economía	Coste de la línea aérea y del cable subterráneo	1.9 – 5.1 millardos de €
	Coste de la central	11.3 – 11.8 millardos de €
	Puestos de trabajo duraderos	1700 – 2500
	Ahorro frente a carbón y gas durante el tiempo de funcionamiento operativo mínimo	hasta 3.8 millardos de €
	Pagos compensatorios incluidos en el tiempo de funcionamiento operativo mínimo	2.6 – 6 millardos de €
	LCOE	12 cént. de €/kWh mín. ~ 4.5 cént. de €/kWh
Ecología	Coste de mantenimiento total	(3.5 cént. de €/kWh CSP-HVDC y ~1 cént. de €/kWh pagos compensatorios)
	Superficie requerida de la central	146 – 149 km <sup>2</sup> (correspondientes al 0,8% de la superficie potencial bruta del CSP en el norte de Marruecos)
	Superficie requerida del trazado	9 km <sup>2</sup> (Cable subterráneo) – 177 km <sup>2</sup> (línea aérea)
	Agua requerida de la central	4.1 millones m <sup>3</sup> /a (refrigeración seca)
Institucional	Reducción de CO <sub>2</sub> frente a carbón y gas	8.4 millones de toneladas/año (Carbón) – 4.2 Mt/a (Gas)
	Comunidades afectadas	369 – 823
Institucional	Duración del proyecto desde la primera información a los ciudadanos hasta la puesta en funcionamiento	10 – 15 años aprox.