

REVIEW OF THE SUSTAINABLE CONCEPT IN ENERGETIC SYSTEMS

Peralta Álvarez, María Estela ¹; Moreno Benavides, Efrén ²; Ávila Gutierrez, Maria Jesús ¹

¹ Universidad de Sevilla, Escuela Politécnica Superior, ² Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Aeronáuticos

Energy availability in the industry has changed to the current level where the main challenge in developed countries is satisfy the growing energy demand. High rate consumption and the world's energy mix are depleting the reserves, generating serious environmental impacts and maximizing social tensions by the imbalance between developed and underdeveloped countries.

It is necessary to set priorities and to manage the situation towards the most efficient solutions; industry must evaluate its energy systems appropriately with a structured analysis which don't prioritize any power source or resource, but it is carried out with a universal, standard and impartial methodology, taking into account all economic, environmental and social impacts and being adaptive to energy processes and technology development.

Axiomatic design and Taguchi engineering, guide and structure the primary objective of this research: to establish a conceptual and methodological framework which is developed with an objective, rigorous and systematic analysis and it allow companies to class and check the best sustainable energy system.

Keywords: *Sustainable Energy Systems; Axiomatic Design; Taguchi Engineering; Sustainable Development; Sustainable Assessment*

REVISIÓN DEL CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD EN LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS

Satisfacer la demanda de energía creciente se ha convertido en uno de los principales retos de la industria. Pero la configuración del mix energético con su elevado ritmo de consumo está agotando las reservas, generando graves impactos ambientales y agravando las tensiones sociales por el desequilibrio entre los países desarrollados y subdesarrollados. Es necesario establecer prioridades y encauzar las soluciones hacia las más eficientes para lo cual la industria debe evaluar sus sistemas energéticos de forma adecuada con un planteamiento estructurado que no de prioridad a ninguna fuente o recurso, sino que se lleve a cabo con una metodología universal, estándar e imparcial, que tenga en cuenta todos los impactos económicos, ambientales y sociales implicados y adaptativa a la continua evolución de los procesos energéticos y su tecnología.

Con estos objetivos se desarrolla el presente trabajo, a partir de la aplicación de las metodologías de diseño axiomático e ingeniería Taguchi que posibilitan la definición del marco conceptual metodológico y los parámetros característicos necesarios que establezcan de un modo objetivo, riguroso y sistemático el pliego de características universales que debe incluir un sistema energético que quiera ser catalogado como sostenible.

Palabras clave: *Sistemas sostenibles energéticos; Diseño Axiomático; Ingeniería Taguchi; Desarrollo Sostenible*

1. Introducción

A lo largo de la historia el modo de vida humano se ha estructurado según el tipo de energía aprovechada siendo una de las mayores y más importantes relaciones la formada entre energía y sociedad. La disponibilidad de la energía ha marcado la evolución de la industria llegando al nivel actual en el que satisfacer la demanda creciente energética es uno de los principales retos de los países desarrollados. Intentando alcanzar este objetivo el mundo se ha visto inmerso en un periodo de crisis energética, encabezada por un sistema de suministro basado en el aprovechamiento de recursos fósiles y energía nuclear, sumándose en las últimas décadas las energías renovables como solución al problema ambiental generado desde la revolución industrial sin llegar las mismas a una solución factible por el punto de desarrollo tecnológico que por ahora tienen. El elevado ritmo de consumo (en tan solo un año se consume lo que la naturaleza tarda en producir hasta un millón de años) está agotando las reservas y generando graves impactos ambientales que afectarán a la satisfacción de las generaciones futuras. Junto a esto, existen tensiones sociales por el desequilibrio entre los países desarrollados y subdesarrollados. Todas las condiciones anteriores definen el actual mix energético como insostenible. La sostenibilidad debe ser adoptada como una característica o estado según el cual las necesidades de la población pueden ser satisfechas sin comprometer la capacidad de satisfacer las necesidades de las generaciones venideras. Para ello es necesario conocer cuál es la situación actual en el sector y comprobar cómo afectará la misma al desarrollo futuro; pero la variabilidad de los procesos de generación hacen del proceso de evaluación de impacto una tarea compleja cuyos resultados no permiten comparar de una manera objetiva tanto las posibilidades, beneficios y ventajas, como los inconvenientes y puntos de mejora de rendimiento de las diferentes tecnologías utilizadas en el sector. No es sencilla la evaluación multicriterio de la sostenibilidad (económica, ecológica, social) dentro de un contexto tan variable. Para un análisis y aplicación adecuada, el concepto de sostenibilidad debería marcar unos criterios claros que toda tecnología debería cumplir y que por ahora, no son exigidos para el sector. Además, sería necesario tener disponibles metodologías que en un ámbito general, marcasen las fases de una evaluación preliminar para que la evaluación de impacto detallada dentro de cualquier proyecto de estas características (a través de herramientas como es el análisis del ciclo de vida ACV) marcarse los límites del sistema de forma objetiva.

2. Objetivos

El desarrollo sostenible está creciendo y abarcando todos los sectores industriales y ámbitos relacionados con la sociedad: uno de los prioritarios es el sector energético por la magnitud de sus impactos negativos sobre el planeta y por el gasto de recursos que supone su explotación. A la hora de plantear, gestionar e implantar proyectos energéticos sostenibles es necesario integrar determinados parámetros como son los relacionados con el diseño y desarrollo de productos, la tecnología y el sistema, las normativas o límites gubernamentales, las nuevas técnicas sostenibles disponibles fuera del ámbito de los estándares o los recientes patrones de producción limpia y consumo responsable, considerando paralelamente las necesidades del usuario y la viabilidad técnica y económica de las soluciones. Para abordar estos objetivos se deben tener en cuenta las tres dimensiones de la sostenibilidad: ecología, economía y equidad, las cuales deben trabajar unidas para conseguir los resultados más eficientes con los cuales se lleve a cabo un mejor uso de los recursos y la reducción de los impactos sobre el medio ambiente. En algún punto de desarrollo de los proyectos, estos factores deberían ser evaluados para comprobar el avance sostenible de los mismos, sus ventajas y desventajas comparados con otros proyectos paralelos y su viabilidad de implantación global a medio y largo plazo. En el contexto energético, esta tarea es compleja por el continuo cambio y desarrollo a los que se ven sometidas las diferentes tecnologías de transformación, por lo que muy pocos de estos

requerimientos son incluidos y si son utilizados no siguen los mismos criterios de valoración para los diferentes sistemas, por lo que su comparación desde el punto de vista de la sostenibilidad no es representativa, equitativa e imparcial.

Por lo que el primer objetivo de este trabajo es establecer y formular el concepto de sostenibilidad en el contexto de la energía así como un marco conceptual donde recoger las características y criterios que definan cada sistema energético como sostenible.

El segundo objetivo es la definición de una guía de evaluación y caracterización atemporal del sistema energético (en adelante SE) que sirva como valoración previa y de apoyo a otras herramientas cuantitativas existentes y que establezca los criterios genéricos que cualquier proyecto energético debería cumplir para ser catalogado como sostenible dentro de la objetividad, rigurosidad y de una forma equitativa entre los diferentes SE.

3. Metodología

A partir del estudio de la situación energética actual y su proyección futura, definiendo las fuentes principales de aprovechamiento y teniendo en cuenta el tipo de recurso energético secundario que puede ser obtenido (energía eléctrica, térmica y mecánica) se establece la primera fase del estudio (**etapa I**), fase inicial necesaria para poder llevar a cabo el primer objetivo de la investigación de conseguir los criterios adecuados para la evaluación de los sistemas energéticos. *Conocida la situación actual y su proyección futura* y para definir y concretar el conjunto de necesidades a cumplir y los criterios que las harían posibles, se utilizaron dos metodologías centradas en el diseño y desarrollo de sistemas industriales que concretaron las siguientes etapas de la investigación: diseño axiomático, para obtener los criterios generales e ingeniería Taguchi, para los criterios relacionados con la calidad. **Diseño Axiomático (etapa II)** nace en torno a los años setenta y fue desarrollada por Nam P. Suh del MIT con el propósito de impulsar la estructuración y resolución de los problemas del proceso de diseño y desarrollo de productos. A lo largo de las últimas décadas ha tenido un elevado número de aplicaciones por su amplio rango de adaptación (desde el diseño de productos y sistemas (Albano, 1992; Guenov, 2005), gestión de organizaciones (Suh, 2006), diseño de sistemas de calidad (Kulak, 2010) o software (Lee, 2001; KIM, 1985), razón por la cual su aplicación en este proyecto se ha considerado como la más adecuada al ofrecer la posibilidad de aplicación a cualquier tipo de sistema sean cuales fuesen sus dimensiones y su variabilidad. *Se obtuvo el grupo de necesidades que debería satisfacer un SE para cumplir con los principios sostenibles y según los dos axiomas de independencia funcional y mínima información que define la metodología, se conocieron los requerimientos funcionales para la definición del marco conceptual y de los criterios de evaluación descritos.*

La segunda, denominada **Diseño Métrico**, fue desarrollada por Gen'ichi Taguchi a principios de los años cincuenta y permitió reforzar el sector industrial en Japón convirtiéndolo en el mayor competidor de la industria estadounidense. Con esta metodología se definieron aquellos criterios para la evaluación referentes a la calidad del sistema. *El resultado implicó redefinir el concepto de calidad en los sistemas energéticos, según la falta de calidad en términos de pérdida generada por el sistema a la sociedad.*

La **etapa IV** se centró en seleccionar la unidad específica general que englobara la valoración del impacto completa (ambiental, social y económico). Para ello y a partir de las necesidades, requerimientos y los principios de definición de la calidad de las etapas II y III, se realizó un estudio de las metodologías actuales de cuantificación más adecuadas y se concretaron las necesidades, criterios, requerimientos y variables de proceso definitivas.

Por último y con todos los datos obtenidos en las cuatro etapas anteriores se concluyó con la **etapa V de resultados** que incluyó la *reformulación del concepto de sostenibilidad en el contexto energético y el desarrollo de la guía de evaluación cualitativa.*

4. Caso de estudio: revisión del concepto de sostenibilidad en el contexto de la energía y creación de la guía de evaluación cualitativa de los SE

4.1. Etapa I. Evaluación inicial de los sistemas energéticos: situación actual y proyección futura, estudio de las fuentes principales de aprovechamiento

La energía es un concepto relativo; para definir unos criterios de evaluación equitativos y que no diesen prioridad a ningún sistema de generación, se tomó como aquel recurso natural que lleva asociado una tecnología de explotación y uso (un bien intermedio utilizado para satisfacer necesidades a través de su transformación). A partir de esta restricción, se definen para cada sistema *características, origen, tipos, extracción, propiedades de las reservas, distribución, tecnología energética, preparación para su uso, principales impactos, ventajas e inconvenientes*. Este estudio preliminar se dividió según la clasificación de los sistemas energéticos en tres grandes grupos: fósiles o no renovables, fuentes de energía renovables tanto las actualmente aprovechables a nivel económico como las que poseen una tecnología que se encuentra en desarrollo pero con una gran proyección futura de aprovechamiento por su gran potencial - solar, eólica, hidráulica, biomasa, de los océanos, geotérmica - y los sistemas energéticos nucleares. Esta primera fase determinó un cambiante desarrollo tecnológico en constante evolución, lo que obligó a la definición de una amplia lista de necesidades que incluía aquellas relacionadas con la demanda de la población actual y las necesidades de las sociedades futuras.

4.2. Etapa II: Aplicación de diseño axiomático a los SE. Obtención de los grupos de necesidades que debería satisfacer para cumplir con los requerimientos sostenibles

Partiendo de la definición universal de sostenibilidad satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras (Brundtland Commission, 1987) el objetivo es ampliarla y especificarla para un SE. Para ello es necesario conocer y determinar las necesidades que se esperan satisfacer con el mismo, las funciones que deben cumplir en el presente y en el futuro y qué parámetros de diseño y evaluación son necesarios para ellas.

El diseño axiomático se establece en cuatro etapas o dominios (cliente, funcional, físico y proceso) y se basa en dos axiomas fundamentales (Independencia e Información) que cualquier sistema debería cumplir en relación a los requisitos previstos. El diseño será la interacción entre "lo que se quiere lograr" y "cómo se logra"; a partir de esto, se cerrarán los dominios de la secuencia de ingeniería compuesta de Suh (2006) según la definición de:

- Los atributos del usuario (ACs) en el dominio del consumidor: son las necesidades que se satisfacen con las funciones del sistema. Son los valores límite o especificaciones frontera que debe satisfacer la solución.
- Los requerimientos funcionales (RFs) en el dominio funcional: resumen lo que queremos lograr. Se satisfacen con una selección adecuada de parámetros de diseño (PDs) en el dominio físico: proceso de diseño que aporta las soluciones que a su vez podrán llevarse a cabo con las variables de producción (VPs) o de manufactura que definen cómo producir el sistema.

En la salida de cada dominio los conceptos quedan estructurados de forma detallada y jerárquica, priorizada y en interacción entre dominios adyacentes. Así las relaciones entre el dominio funcional y físico aportarán el diseño del sistema, y las relaciones entre el físico y proceso, el diseño del proceso.

Una vez se han completado los dominios, es necesario evaluarlos a través de los dos axiomas característicos de la metodología:

1. **Axioma de independencia:** un sistema debe mantener la independencia entre sus RFs.
2. **Axioma de mínima información:** el mejor sistema (en este caso, el más sostenible) es aquel funcionalmente desacoplado que tiene un contenido mínimo de información.

Para el caso de estudio y a partir de la información de la etapa I, se concretaron un conjunto de necesidades iniciales en el dominio del consumidor, se definieron los requerimientos funcionales (RFs), parámetros de diseño (PDs) y variables de proceso (VPs) que las hicieran posible en el dominio funcional, físico y de proceso y a partir de los dos axiomas se redujeron, jerarquizaron según importancia de actuación y se concluyó con la definición definitiva de la lista de requisitos funcionales y restricciones del SE sostenible para concretar los criterios correspondientes e introducirlos en la guía.

Se definieron cuatro grupos para clasificar estas necesidades generales: SE, procesos implicados, consecuencias en su explotación y uso, eficiencia energética y costes. Posteriormente se estudiaron individualmente las dependencias entre todas ellas, se agruparon y se redefinieron para conseguir el conjunto de necesidades independientes (para hacer cumplir el axioma I) teniendo en cuenta que en conjunto debían abarcar las tres dimensiones de la sostenibilidad (económica, ecológica y social).

Con el estudio de necesidades y comprobando que no todas tenían la misma aportación dentro del impacto global, se llevó a cabo una jerarquización según su especificación a través de un análisis AHP (Navneet, 2004) para la obtención del modelo jerárquico. El propósito del método es permitir la estructuración del problema energético multicriterio de forma integral, mediante la construcción de un modelo de necesidades, su priorización, las comparaciones binarias entre ellas y finalmente su evaluación mediante asignación de pesos para aportar un ranking que fue evaluado con un análisis de sensibilidad.

Como resultado se obtuvieron un total de 20 ACs, 30 RFs, 30 PDs y 30 VPs que fueron sometidos a los dos axiomas característicos.

Primer axioma de independencia funcional para sistemas energéticos

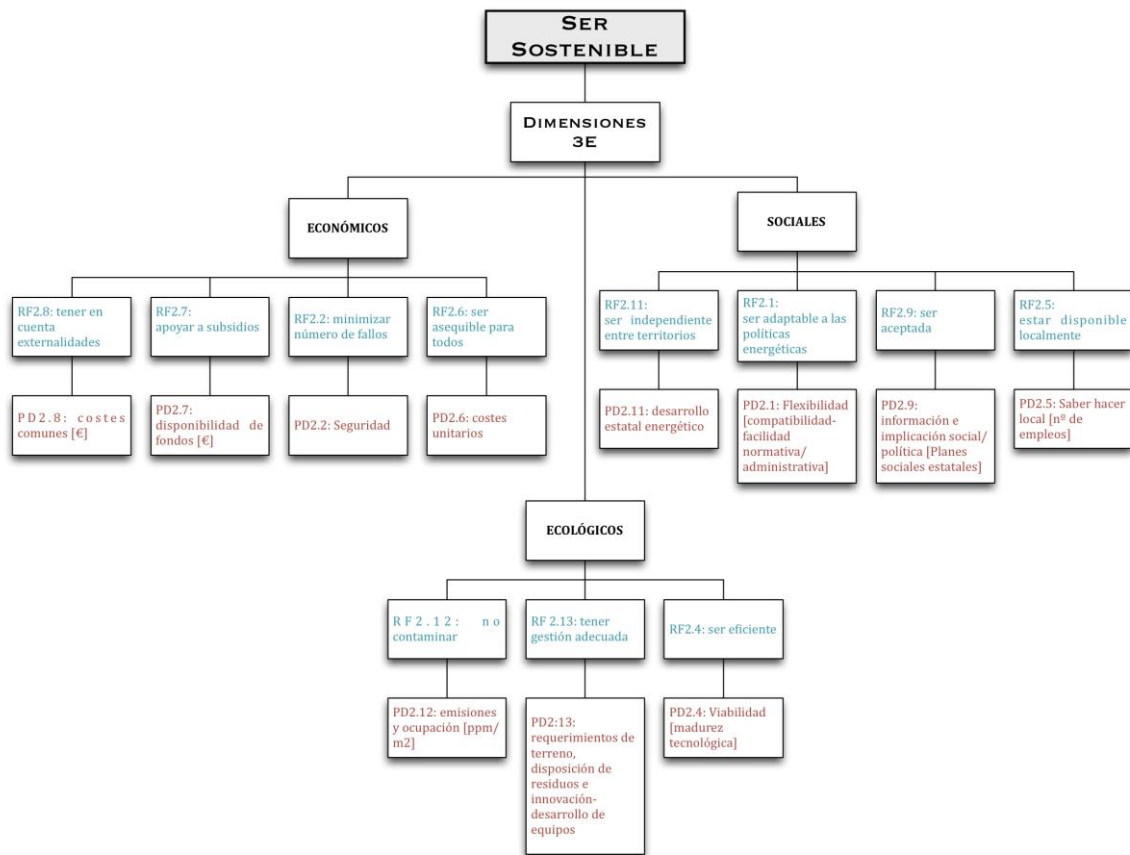
El planteamiento del primer axioma tiene como objetivo conocer y elaborar una lista común de requisitos y restricciones atemporales e independientes de un SE para ser caracterizado como sostenible y encontrar los requerimientos de evaluación para el contexto de "SE". Teniendo en cuenta que los RFs tienen que ser independientes, una vez definidos los 30 iniciales, se redujeron a los que recoge la figura 1 cuya independencia quedó evaluada y demostrada a través de la metodología de Suh (1999): aquellos con dependencia se procedió a su agrupación y los definitivos se clasificaron según la especificación de la dimensión sostenible a la que pertenecían. Se aplicó QFD (despliegue de la función de calidad - quality function deployment) para comprobar la validez de los mismos y garantizar la atención de todas las expectativas y necesidades.

Axioma de mínima información

El axioma de información pretende minimizar el contenido de información del sistema [1]. Es la medida del conocimiento requerido para satisfacer un RF dado o la capacidad tecnológica para lograrlo. Con este segundo axioma se determina la métrica para la toma de decisiones sobre el nivel de cumplimiento de las distintas alternativas de RF obtenidos. Establece que el sistema más sostenible es aquel que tenga la probabilidad de éxito más alta en la satisfacción de los RF a mínima complejidad (Suh, 2006). Los RFs del estudio combinan información cuantitativa y cualitativa por lo que se optó para la valoración de la cantidad de información por la técnica FUZZY o lógica difusa. Puede ser utilizada para evaluar difusos términos lingüísticos, conjuntos o números y transformarlos de una forma estándar a

números difusos (TFNs: trigonometric fuzzy numbers) a los cuales se les asignarán puntuaciones determinadas a través de escalas establecidas por el evaluador. Permite cuantificar la cantidad de información de cada RFs de forma precisa. Kahraman (2008) y Kim (1985) aplican la metodología completa para el cálculo del contenido de información I para un determinado FRi la cual se define según la probabilidad pi de que el RF se cumpla y definiendo log2 para la obtención del número de bits (0,1) para la cantidad de información. El contenido de información total para el sistema completo (con n RF) es la suma de las probabilidades individuales. Si el contenido de información tiende a infinito el sistema no cumplirá con las necesidades (no será sostenible) a no ser que se replanteen sus RFs. Y para que sea 0 (totalmente sostenible) todas las probabilidades individuales deben ser 1.

Figura 1. Requerimientos Funcionales y parámetros de diseño definitivos (axioma I)



Este contenido de información se utilizará en la metodología para comparar diferentes sistemas o, como en el caso de estudio aplicado, comparar la evolución del mix energético en dos periodos diferentes: situación actual cuyos datos fueron escogidos para 2011 por la completitud de los mismos y la previsión de evolución en el horizonte 2020 (IDEA, 2011; Eurostat 2011; EIA 2011; Steering Committee 2011; Ciemat, 2012). Según las expectativas, la evaluación debería dar a conocer una $I_{2011} > I_{2020}$.

Con esta metodología se puede predecir cuál será el avance temporal de la probabilidad de éxito de los RFs estudiados y cómo evoluciona el contenido de información según se desarrollan tecnológicamente, económicamente, socialmente y ecológicamente cada uno de los atributos de los sistemas, pudiendo replantear aquellos RFs menos satisfactorios para el cumplimiento de las necesidades.

Como se puede comprobar en la figura 1, existen RFs con tendencia a maximización (ej: independencia territorial) o a minimización (ej: impacto contaminante). Para ilustrar el caso de estudio se incluyen los datos correspondientes a aquellos que deben minimizarse.

Figura 2. Sistema de aproximación numérico para factores intangibles a minimizar

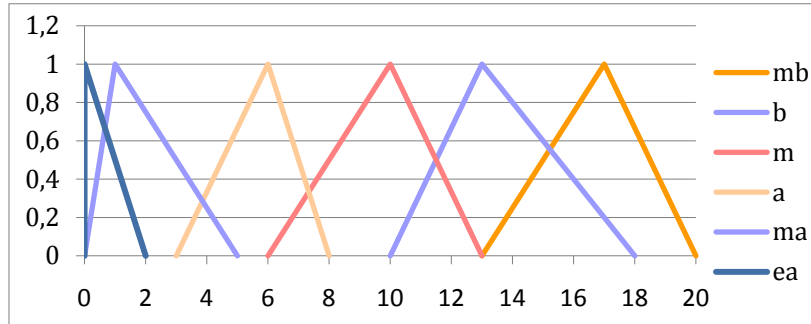


Tabla 1. Valoraciones de los SE según expectativas, para los RF a minimizar

RF		Energía Fósil	Energías Renovables	Energía Nuclear
Horizonte 2011				
RF4	Externalidades	MP	M	MP
RF13	Número de fallos	mb	mb	m
RF8	Contaminación	a	b	m
RF6	Costes	m	a	m
Horizonte 2020				
RF4	Externalidades	MP	M	MP
RF13	Número de fallos	mb	mb	b
RF8	Contaminar	m	b	m
RF6	Costes	m	a	m

Tabla 2. Resultados del cálculo de contenido de información completa (2011 – 2020)

Horizonte actual (2011)					Horizonte futuro (2020)					
RFs	I-EF	I-ER	I-EN	Sistema Real	RFs	I-EF	I-ER	I-EN	Sistema a General	Sistema ideal
RF4	3,1293	2,4150	3,3923	8,9366	RF4	3,1293	2,4150	2,4150	7,9594	debe ser muy bajo
RF12	1,5261	2,9069	1,5261	5,9590	RF12	2,2224	1,5261	3,1293	6,8777	debe ser bueno
RF13	1,3334	1,3334	3,3923	6,0592	RF13	1,3334	1,3334	2,4150	5,0819	debe ser muy bajo
RF8	3,1293	2,4150	3,3923	8,9366	RF8	3,1293	2,4150	3,3923	8,9366	debe ser muy bajo
RF5	2,2224	2,9069	2,9069	8,0362	RF5	2,2224	1,5261	1,5261	5,2745	debe ser bueno
RF2	2,2224	2,3219	2,9069	7,4512	RF2	2,2224	2,2224	2,9069	7,3517	debe ser muy bueno
RF7	2,3219	1,5261	2,2224	6,0704	RF7	2,3219	1,5261	2,2224	6,0704	debe ser media
RF1	1,5261	2,2224	1,5261	5,2745	RF1	3,1293	3,1293	3,1293	9,3878	debe ser buena

RF6	3,3923	3,1293	3,3923	9,9139	RF6	3,3923	3,1293	3,3923	9,9139	deber ser bajo
RF11	1,5261	3,1293	2,9069	7,5622	RF11	2,2224	3,1293	1,5261	6,8777	debe ser media
RF9	1,5261	2,9069	1,5261	5,9590	RF9	1,5261	2,2224	1,5261	5,2745	debe ser buena
	23,855	27,21	29,090	80,1590		26,851	24,574	27,580	79,0063	

Para la interpretación de los resultados es necesario poner atención en el contenido de información obtenido: $I_{\text{mix-2011}} = 80,15$; $I_{\text{mix-2020}} = 79,00$. Se comprueba una pequeña reducción según las políticas y expectativas del mix en 8 años. Cuando este contenido de información sea 0, el sistema será sostenible. Hasta entonces, es necesario seguir avanzando en el desarrollo tecnológico modificando cada uno de los RFs (maximizables o minimizables) según los PD y VP asociados a cada uno.

En cuanto al contenido de información individual, la probabilidad de que se cumplan los RFs de cada sistema empieza con las fuentes fósiles (I-EF), siguiendo la energía nuclear (I-EN) y las renovables (I-ER) resultado que refleja la utilización actual de las mismas. La evolución según las previsiones, y sin modificar ninguna de las valoraciones y precio de mercado que se llevan a cabo actualmente de cada tipo de energía, apunta a un horizonte futuro donde las energías renovables se desarrollan y se interponen como el SE fundamental y sostenible.

Esta información podría indicar que se deberían eliminar aquellos recursos energéticos con más contenido de información, o reducir su uso hasta mejorar su eficiencia global. Pero según la etapa I de esta investigación, esta situación no es posible para el mix energético actual ya que posee ciertas limitaciones que hay que tener en cuenta a la hora de la toma de decisiones y desarrollo de soluciones responsables (por ejemplo, algunas fuentes con menos contenido de información, no son actualmente viables a gran escala). Hasta el alcance de la situación más sostenible, se debe operar optimizando el uso de fuentes energéticas no renovables y potenciando lo máximo posible el uso de las renovables para preservar el futuro energético de las siguientes generaciones.

4.3. Etapa III: Ingeniería Taguchi aplicada a los sistemas energéticos

*Objetivo: invertir el concepto de calidad en un SE para incluirlo en el proceso de evaluación de forma menos compleja, es decir, evaluar la **falta de sostenibilidad del sistema** seleccionando los criterios específicos a incluir en la guía relacionados (desde el punto de vista de la pérdida generada por el producto a la sociedad)*

Los métodos tradicionales de control de la calidad estiman un valor medio-objetivo y sus límites de control a partir del cual se lleva a cabo un control estadístico para descartar o preparar todos aquellos elementos que no cumplan el objetivo. Genichi Taguchi (1999) revolucionó los procesos de fabricación y control teniendo en cuenta la calidad desde otro punto de vista. Su objetivo era diseñar productos menos sensibles a los factores aleatorios (llamados ruido) que interfieren en su calidad. A través de tres etapas, la clave para la reducción de la pérdida no consiste en cumplir con las especificaciones, sino en reducir la varianza con respecto al valor objetivo. La *función de pérdida* de Taguchi aporta un nuevo lenguaje de comunicación y de adaptación, aprovechable para el objetivo de esta investigación que será aplicado como posible forma de evaluar los SEs y poder incluir su precio real comparándolo con la calidad (o falta de calidad: pérdida (a minimizar) que su utilización causa en la sociedad). Taguchi (Peña, 1994; Sreenivas, 2008; Moreno, 2012) define dos conceptos fundamentales para crear sistemas: **mejora continua** (que en este caso se toma para los RF2.7, RF2.4, RF2.1) y **función de pérdida** de tipo parabólico con vértice en el valor nominal central m , para el cual, aquellos sistemas que se alejen (y adquieran una función cuadrática) mayor pérdida de calidad tendrán implícita sus procesos. Con este método se penaliza la mayor desviación del valor nominal (Peña, 1994) – (en la

actualidad la sociedad está pagando por la falta de calidad del SE (RFs a minimizar): una cuarta parte paga en términos monetarios, la restante paga en términos elementales. Actualmente, gobiernos y empresas generadoras hacen “retoques” para enderezar los defectos y daños que están perjudicando a la sociedad y el planeta, reflejándolo a la baja en el precio de mercado. Esta falta de calidad es externa (escasa fiabilidad, baja eficiencia, contaminación, mala gestión, inseguridad de abastecimiento, etc.). Para incorporar todos estos principios al SE se deben seguir las tres etapas de la metodología Taguchi: 1. Diseño del sistema: identificar los factores que afectan a las características de calidad según magnitud y variabilidad, 2. Diseño de parámetros - PDs: definir los niveles óptimos en que debe fijarse cada parámetro para optimizar las actividades y procesos, y 3. Diseño de tolerancias - perturbación: identificar aquellos factores que no afecten a las características de calidad para liberar el control de los mismos y minimizar costes.

A partir de esta lógica en el proyecto se equipara la calidad a la sostenibilidad y a su vez la falta de calidad a la falta de sostenibilidad, **métrica a incluir en la guía de evaluación.**

Para ello se definieron una serie de principios de evaluación detallados a partir de la metodología (Nair, 1992; Moen, 1991) adaptados al sector energético. La aplicación de los mismos en interacción con los resultados de la etapa II, estableció los PDs de calidad con los cuales el efecto de perturbación sobre las características de funcionamiento se reduce al mínimo para el SE global: PD2.8 costes comunes y uniformes, PD2.12 emisiones y ocupación [ppm/m²]. Los resultados fueron:

1. PDs que reducen el coste sin afectar la calidad (sostenibilidad): PD2.13 terreno, residuos e I+D de equipos, PD2.2 Seguridad, PD2.7 disponibilidad de fondos [€]
2. PDs con influencia sobre el valor medio de la característica de funcionamiento, pero no tienen ningún efecto sobre su variación: PD2.4 Viabilidad [madurez tecnológica y uso eficiente de cada fuente], PD2.5 Saber hacer local [nº de empleos]
3. PDs con influencia detectable sobre las características de funcionamiento y sobre los cuales se pueden rebajar los niveles de tolerancia: PD2.11 desarrollo estatal energético, PD2.1 Flexibilidad [compatibilidad-facilidad normativa/administrativa], PD2.9 información e implicación social/política [Planes sociales estatales]

4.4. Etapa IV: unidad global de caracterización de los sistemas energéticos

Al igual que cualquier otra actividad industrial, el aprovechamiento y uso de la energía a través de los medios actuales de explotación produce impactos ambientales inherentes en el planeta y sus seres vivos. La herramienta actual más usada con la cual se contabiliza cada recurso es el precio de las diferentes formas en que está presente. Es una manera sencilla de obtener un valor cuantitativo comparable de los diferentes procesos de transformación. El problema implícito en la estimación del precio de la energía actualmente es que no contabiliza la magnitud real del daño de los impactos, por lo que los sistemas no son comparables a la hora de valorar su sostenibilidad. Es decir, el precio de la energía actual deja fuera **las externalidades** (situaciones en las cuales los costes de producción y consumo de un bien o servicio no están reflejados en el precio que poseen en el mercado).

Los costes reflejados actualmente para la energía implican costes de capital (preparación – I+D, construcción, integración –instalación, puesta a punto, conexión a la red-, gestión, seguridad), los costes circulares (operación –combustible, personal y mantenimiento) y otros costes (overead y finalización o desmantelamiento). Además, uno de los inconvenientes (Verbruggen, 2010) de los SEs es la variabilidad de los factores influyentes en los costes relacionados no con la propia fuente, sino con otros factores externos relacionados con el precio (coste del dinero, disponibilidad de fondos, etc.), con los recursos disponibles (cantidad y facilidad de obtención), con el desarrollo tecnológico y cantidad de equipos (por

ejemplo en muchos sistemas de captación de energías renovables los costes de inversión varían fuertemente en función del número y tamaño de los equipos –turbinas eólicas o paneles solares-) y con el territorio (costes de fabricación, mano de obra, impuestos, suelo, disponibilidad de subvenciones, etc.)

Unidad global: el coste real energético que incluye externalidades

El sistema de costes energético actual no es sostenible al no reflejar la realidad de los impactos. En general las externalidades o fallos de mercado nacen cuando las actividades sociales y económicas de un grupo de personas tienen un impacto negativo en otro grupo. En el sector energético, son aquellos costes asociados al impacto ambiental por la unidad de generación (los daños y perjuicios que tienen lugar) o lo que es lo mismo, todos aquellos no reflejados en el precio de mercado cuya inclusión en algunos casos supondría para algunas fuentes duplicar su precio.

Se producen a lo largo de todo el ciclo de vida del sistema (explotación, producción, transporte, transformación, consumo y gestión de residuos). Por lo tanto en todo sistema deberían incluirse (Delacámara, 2008): **el coste social de la energía y el precio de mercado.** En la actualidad no es rentable incluir las externalidades porque determinadas fuentes como las convencionales (por ejemplo en los procesos de importación-exportación) o la energía nuclear (en el caso de la seguridad y toxicidad de los residuos) no se ven beneficiadas; el resultado son unos precios bajos con los que las energías renovables a corto plazo no pueden competir, desalentando a su vez la inversión en el desarrollo de las nuevas tecnologías energéticas limpias.

Tabla 3. Coste de impactos según fuente (European Commission, 2012)

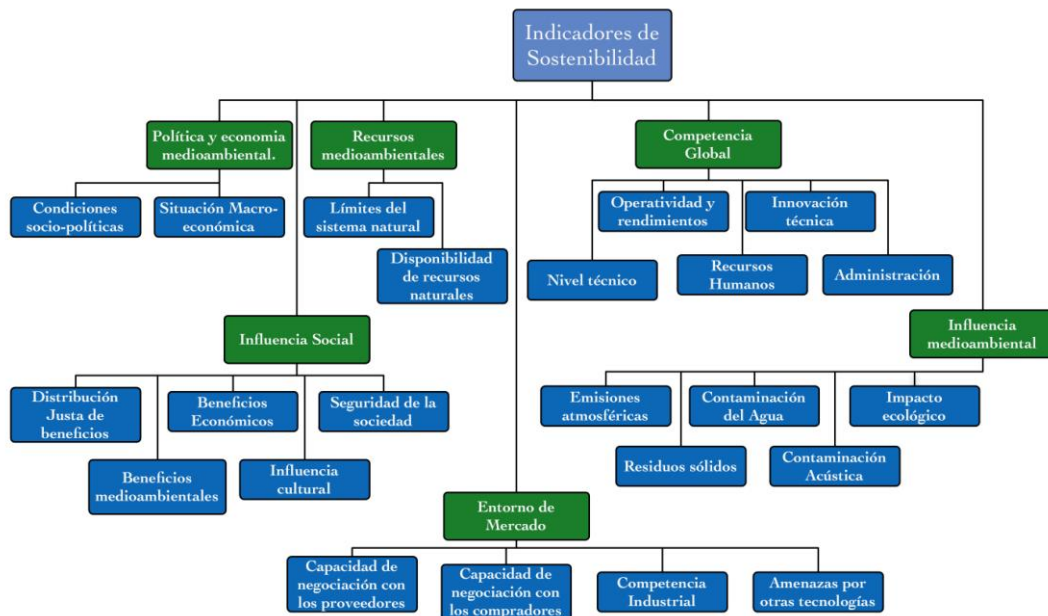
Cent.€/kWh	Fósil			Renovables		
	carbón	gas natural	Nuclear	FV	Eólica	Hidráulica
Impacto						
Ruido	0	0	0	0	0,005	0
Salud	1,72	0,34	0,17	0,45	0,072	0,051
Material	0,035	0,007	0,002	0,012	0,002	0,001
Agrarios	0	0	0,0008	0	0,001	0,0002
Total	1,76	0,35	0,17	0,46	0,08	0,05
Ejemplos de costes NO incluidos (externalidades)						
Daño a ecosistemas	0,98	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03
Cambio climático	3,6	0,73	0,03	0,33	0,04	0,03

Externalidades de la producción de electricidad en la UE (Ower, 2006).

Fuente	Carbón	Petróleo	Gas	Nuclear	Biomasa	Hidráulica	Viento	F.V.	ud
UE	2-15	3-11	1-4	0,2-0,7	0-5	0-1	0-0,25	0,6	€/kWh

El SE sostenible deberá incluir este sistema de costes (Hohmeyer, 1992; CEMBA, 2010) y **la eficiencia será el principio competitivo y no el precio.** Hasta que el coste final no refleje estas externalidades no podrá definirse la sostenibilidad de los SEs por las distorsiones en el uso. Es un proceso complejo, porque cada fuente y su tecnología generan un impacto diferente: por lo que se hace necesario definir un sistema de evaluación normalizado que comienza (Llamas, 2012) con el estudio físico de los impactos - a través de métodos como el análisis del ciclo de vida ACV (CME, 2004; Stiassnie, 2007; Varun, 2009) con el que se cuantifican los flujos de materia y energía - para pasar a la evaluación económica de los mismos, es decir, cuantificación monetaria para ser incorporadas en el marco del análisis coste-beneficio de las decisiones públicas o privadas de la sociedad.

Figura 3. Indicadores para coste real de la energía (Linares, 2012)



En la actualidad son muchos los indicadores utilizados para cuantificar el coste energético, pero en muy pocas situaciones se utilizan en conjunto para aportar una valoración global. Empresas e instituciones sólo utilizan aquellos indicadores que les benefician y les colocan en posiciones competitivas de mercado, por lo que algunos son los dominantes mientras que otros quedan en desuso. Una evaluación correcta debería incluirlos todos para fomentar el modelo neutral. A lo largo de las últimas décadas se han desarrollado algunos métodos, aunque solo han sido aplicados en investigaciones: top-down (Hoheyer, 1988), bottom-up (Ottinger, 1991; Pearce, 1992), *costes de control* y *función del daño* (ExternE, 1995; Rowe, 1995; CIEMAT, 2011), el indicador del **excedente del consumidor** para el cálculo de las externalidades (Delacámara, 2008) o los eco-costes para el cálculo de la inversión de recuperación del planeta dañado (TuDelf, 2010).

Aplicación al caso de estudio de la valoración actual de los SEs

De la etapa IV surgen por tanto un conjunto de criterios implícitos al RF4 a incluir en la guía para la evaluación del SE en su dimensión económica: costes de salud (enfermedades) y psicosociales (desplazamientos, expropiaciones, empobrecimiento, etc.), costes medio ambientales (incluido el agotamiento de recursos), subsidios totales (investigación y desarrollo I+D, inversión) y costes imputables a la probabilidad bélica (militares, seguridad).

Cuando el mix actual es valorado según los criterios expuestos, los resultados son:

1. El uso de recursos escasos o no renovables en actividades competitivas y de alta demanda valorados según "precios del mercado" sin contemplar todos los costes de su ciclo de vida, fomenta el uso ineficiente (procesos donde otras fuentes serían más rentables y con más rendimiento) y un gasto innecesario, elevado y a una velocidad que no respeta la recuperación planetaria → no se cumplen el RF2.8 y RF2.4,
2. Si el precio final de la energía no refleja todos los costes internos y externos, el consumidor no los asume y son trasladados a otros grupos sociales que se ven perjudicados tanto en factores medioambientales (salud, agotamiento de recursos, destrucción de hábitats) como económicos y sociales (reparto desigual: $\frac{1}{4}$ de la población mundial consume $\frac{3}{4}$ partes del total de la energía disponible, o lo que es lo

mismo, existen 2000 mill. de personas sin acceso a la energía eléctrica → no se cumple RF2.6, RF2.11 ni RF2.5.

3. Abaratar las fuentes energéticas está produciendo un coste para las generaciones futuras, daños económicos y medioambientales (contaminación por mala gestión y aprovechamiento de recursos contaminantes) → no se cumplen RF2.12, RF 2.13.
4. Este abaratamiento de fuentes no sostenibles también perjudica al desarrollo de aquellas que podrían llegar a alcanzar una producción eficiente y con un reparto equitativo para la sociedad. Frena el desarrollo y la investigación al no poder competir con energías mucho más baratas económicamente → hace que no se cumplan RF2.7, RF2.2, RF2.4.
5. Las políticas actuales que comenzaron como medidas de lucha sostenible (para el cambio de mentalidad, desarrollo de sistemas alternativos o abaratar costes de otras fuentes más renovables) sólo llegan a ser mecanismos recaudadores, gastos que empresas y consumidores están dispuestos a asumir al resultar más rentables que una inversión o un uso eficiente del recurso. Es el caso por ejemplo de los impuestos sobre los costes de los combustibles para vehículos. Situación que frena el RF2.1.

5. Resultados

Los resultados de esta investigación están reflejados en un documento que recoge la reformulación del concepto de sostenibilidad en el contexto energético según los criterios resultantes de las etapas descritas (generales, de calidad y económicos). El objetivo es aportar un marco conceptual y de evaluación para los SEs claro y eficiente, haciendo posible una fácil caracterización racional comprobando si cumplen los requerimientos funcionales previos que deben satisfacer las necesidades universales e individuales de la sociedad, fomentando un desarrollo económico equitativo de los territorios y asegurando la protección y la mejora del medio ambiente. Las motivaciones para su desarrollo han sido aportar una metodología cualitativa previa para obtener una base de información que guía la evaluación en detalle que pudiese aplicarse posteriormente a través de otras herramientas y técnicas existentes cuantitativas (como podría ser el ACV entre otras). La **guía completa** puede ser aportada por la autora. A modo de resumen se explica su utilización y su contenido ya que por razones de extensión no es posible incluirla en este documento en su forma completa.

5.1. Reformulación del concepto de sostenibilidad en el contexto energético

Un sistema energético sostenible será aquel que partiendo de su optimización sucesiva, permita satisfacer las necesidades actuales sin destruir las posibilidades de las generaciones futuras, integrando adecuadamente y en equilibrio dinámico los factores funcionales sociales, económicos y ecológicos siguientes:

1. Incluir las externalidades en su apreciación económica, teniendo en cuenta un sistema económico basado en la generación de valor ambiental, calidad tecnológica y bienestar social (no valor monetario).
2. Apoyo a subsidios para hacer posible su continuo desarrollo.
3. Garantizar la máxima seguridad.
4. Minimizar el impacto ambiental.
5. Tener gestión adecuada de aprovechamiento cíclico (residuo=recurso).
6. Maximizar la eficiencia de todos los procesos.
7. Asegurar el abastecimiento creando independencia energética entre territorios

8. Ser adaptable a todas las políticas energéticas
9. Tener costes asequibles para todos
10. Aceptabilidad: respetar las preferencias sociales según territorios y recursos
11. Con una tecnología capaz de adaptarse y de ser llevada a cualquier territorio: disponibilidad local

Creando un sistema abierto que además de auto-regularse (a semejanza de los ecosistemas naturales), permita su restauración, mantenimiento y ampliación.

5.2. Guía de caracterización de la sostenibilidad de los SEs

La metodología está compuesta por cuatro etapas, *I: Análisis general del SE, II: Análisis detallado de la dimensión económica, III: Análisis detallado de la dimensión ecológica y IV: Análisis detallado de la dimensión social*. Cada una de ellas está formada por un total de 25 estadios que recogen los criterios obtenidos a lo largo de las etapas de esta investigación a través de un macroindicador. Estos macroindicadores son de ámbito general, no intentan evaluar cuantitativamente el SE, sino caracterizar su falta de sostenibilidad indicando el impacto que pueda surgir con su explotación a través del no cumplimiento del criterio en cuestión. La aplicación posterior de las otras herramientas mencionadas darían la cuantificación real del impacto, o si es el caso, la cantidad de información obtenida con el método de la etapa dos. Al definirlo como guía atemporal y multicriterio, puede ser una directriz para llevar un seguimiento adecuado a medida que el SE avance tecnológicamente. Para un uso eficaz de la misma se deben asignar todos los macroindicadores independientemente de la fuente o recurso a analizar. En primer lugar el SE debe cumplir con todos los estadios de la etapa I (general). Una vez alcanzados, se deben aplicar los tres bloques agrupados en las tres dimensiones sostenibles y que han sido formulados según los requerimientos funcionales estudiados en los apartados anteriores (la agrupación se ordena según el chequeo) obteniendo de esta manera resultados más específicos para las fuentes, caracterizándolas pudiendo encontrar sus puntos fuertes, débiles y las **barreras actuales a superar**. Si al final de la evaluación el SE cumplen todos los macroindicadores, este podrá ser caracterizado como totalmente sostenible (la cuantificación se hace añadiendo 1 punto por estadio) y si al contrario, alguna de las respuestas resultan negativas corresponderá al no cumplimiento del criterio, que hará aumentar el contenido de información del axioma 2 (disminuyendo la puntuación en 0,5 puntos).

6. Conclusiones

El consumo de energía ha resultado uno de los indicadores de bienestar y crecimiento económico desde la revolución industrial. Es necesario invertir este pensamiento consiguiendo sistemas caracterizados por su origen sostenible (renovable, limpio y eficiente), con procesos que tengan el mejor rendimiento y donde no exista el consumo innecesario e irresponsable de los recursos. La sostenibilidad actual de los SEs se encuentra en un periodo de difícil transición. Una de los principales objetivos es el aumento de la eficiencia de sus procesos, perjudiciales para el planeta por la explotación incontrolada de recursos, el tratamiento de los elevados flujos de contaminantes y las dificultades tecnológicas necesarias para el aprovechamiento de algunas fuentes energéticas. El desarrollo de esta investigación ha permitido definir aquellas características que hacen que un SE sea más sostenible que otro, además de adaptar y detallar la definición de desarrollo sostenible al sector energético. Concretando de una manera clara y precisa cuales son las oportunidades y barreras del sistema global mundial energético se ha podido desarrollar una guía atemporal con la que poder caracterizar la estructura, explotación y utilización de los SEs actuales o futuros.

7. Bibliografía

- Albano, L. & Suh, N (1992). Axiomatic approach to structural design. *Reseng Des* 4:171-183.
- Baños, R., Manzano, F., Montoya, F.G., Gil, C., Alcayde, A. & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Ren. & Sust En Rev* 15(4): 1753-66.
- Baumgärtner, S. & Quaas, M. (2010). Sustainability economics - General versus specific, and conceptual versus practical. *Ecological Economics* 69(11): 2056-2059.
- Ciemat- portal de Energías Renovables. Energías Renovables: situación actual. IT.
- CIEMAT. (2011). European Commission, Directorate-General XII, Science, Research and Development, ExternE Externalities of Energy. Vol XX : National Implementation.
- Comisión Europea: investigación e innovación. (2012). Portal de desarrollo energético.
- Consejo Mundial de la Energía – CME. (2004). Comparación de los sistemas energéticos utilizando ACV. Informe especial del Consejo Mundial de la Energía.
- Delacámara, G. (2008). Guía para decisores Análisis económico de externalidades ambientales. Naciones Unidas, CEPAL: Santiago de Chile.
- EIA, Independent Statistics & Analysis. (2011). International energy outlook 2011. US. Energy Information Administration. report number: DOE/EIA-0484(2011).
- European Commision. (2003). External Costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport. Directorate-General for Research, Brussels.
- Eurostat Statistical Books. (2010). Energy. Yearly Statistics 2008. European commission. ISBN 978-92-79-14616-9. DOI 10.2785/39014. Luxembourg.
- Guenov, M.D. & Barker, S.G. (2005). Application of Axiomatic Design and Design Structure Matrix to the Decomposition of Engineering Systems. *Systems Engineering* 8: 1
- Hohmeyer, O. (1992). Renewables and the full costs of energy. *Energy Policy* 20: 365-375
- IDEA. (2010). Plan de acción nacional de energías renovables de España (PANER) 2011-2120. Ministerio de industria, turismo y comercio: gobierno de España.
- Kahraman, C. (2008). Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making: Tehory and Applications with Recent Developments. Springer, ISBN: 1931-6828.
- Kim, S., & Suh, N.P. (1985). Application of symbolic logic to the design axioms.. *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing* 2(1): 55-64
- Kulak, O., Cebi, S. & Kahraman, C. (2010). Applications of axiomatic design principles: A literature review. *Expert Systems with Applications* 37: 6705–6717
- Linares-Llamas, P. (2012). Externalidades de la energía y su valoración. U. Pontificia Comillas, IT.
- Navneet, H. Rai, L. (2004). Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process. London: Springer-Verlag. ISBN 1-85233-756-7.
- Onat, N. & Bayar, H. (2010). The sustainability indicators of power production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9): 3108-3115.
- Owen, A. (2006). Renewable energy: Externality costs as market barriers. *Energy Policy* 34: 632–642.
- Peña, J. (1994). Calidad Total, una utopía muy práctica. Ed. U. Comillas. ISBN 9788487840593
- Steering Committee. (2011). Renewables 2011. Global Status Report. REN21.
- Stiassnie, E. & Shpitalni, M. (2007). Incorporating Lifecycle Considerations in Axiomatic Design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56(1): 1-4
- Suh, N.P. (1990). *The Principles of Design*, Oxford University Press, ISBN 0-19-504345-6
- Suh, N.P. (2006). Application of Axiomatic Design to Engineering collaboration and negotiation. 4th International Conference on Axiomatic Design, Firenze
- Taguchi, G., Subir, M. & Yuin. (2004). Taguchi's Quality Engineering. ISBN-10: 0471413348
- Varun, Bhat I.K. & Prakash, R. (2009). LCA of renewable energy for electricity generation systems :A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(5):1067-1073.
- Verbruggen, A., Fishedick, M. Moomaw, W, et al. (2010). Renewable energy costs, potentials, barriers: Conceptual issues. *Energy Policy* 38: 850–861