



APLICACIONES INDUSTRIALES

Análisis de riesgo aplicado al estudio de la sostenibilidad energética

Risk analysis applied to the study of the energy sustainability

Antonio Torres Valle^{1, *}, Bárbara Garea Moreda³, Laura E. Suazo Torres⁵, Ulises Jáuregui Haza², Erich Martínez Martín⁴

¹ Universidad de la Habana, La Habana. Cuba.

² Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana

³ Agencia de Energía Nuclear y de Tecnologías de Avanzada, Cuba.

⁴ Central Nuclear de Turkey Point, USA.

⁵ Universidad Zamorano, Honduras

*Autor de correspondencia: antoniotorresvalle@gmail.com

Recibido: 2 de febrero del 2021 Aprobado: 30 de mayo del 2021

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional



RESUMEN/ABSTRACT

Durante los últimos años, los análisis de riesgo han encontrado aplicación en múltiples sectores de la tecnología y la sociedad. El artículo propone un sistema integrado de análisis de riesgo aplicado a los estudios de sostenibilidad energética. En este contexto se enmarcan los estudios de percepción de riesgo o riesgo subjetivo sobre cambio climático, los análisis de impacto por empleo de fuentes renovables de energía en los riesgos objetivos asociados al calentamiento global y las evaluaciones de confiabilidad tecnológica aplicados a fuentes sostenibles de energía. El sistema propuesto se ha implementado a través de códigos informáticos específicos (RISKPERCEP, SIMENI-CC, MOSEG), los que atienden cada uno de los frentes referidos a los análisis de riesgo esbozados. Se presentan ejemplos de aplicaciones de análisis de riesgo que consideran el empleo de fuentes renovables de energía como alternativa para la sostenibilidad energética.

Palabras clave: Análisis de riesgo; cambio climático; fuentes renovables de energía, sostenibilidad energética.

In recent years, risk analysis has found application in multiple sectors of technology and society. The article proposes an integrated risk analysis system applied to energy sustainability studies. In this context are framed the studies of risk perception or subjective risk on climate change, the impact analysis of the use of renewable energy sources on the objective risks associated with global warming and the technological reliability evaluations applied to sustainable energy sources. The proposed system has been implemented through specific computer codes (RISKPERCEP, SIMENI-CC, MOSEG), which address each of the fronts referred to the risk analyzes outlined. Examples of risk analysis applications that consider the use of renewable energy sources as an alternative for energy sustainability are presented.

Keywords: Risk analysis; climate change; renewable energy; energy sustainability.

INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad energética es un problema multifacético y difícil de abordar, pues significa la solución integral de todos los factores que la determinan. El papel clave de la energía en este contexto se debe a su contribución fundamental en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico.

Cómo citar este artículo:

Antonio Torres Valle; et al. Análisis de riesgo aplicados al estudio de la sostenibilidad energética.
2021, vol. 42, n. 3, septiembre/diciembre. ISSN:1815-5901.

Sitio de la revista: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE>

El logro de esta sostenibilidad requiere resolver, simultáneamente, la seguridad energética (interpretada como estabilidad y calidad de la energía generada); la equidad social (relacionada con el derecho a la energía de toda la sociedad) y la sostenibilidad ambiental (asociada a la generación de energía con bajo impacto al medioambiente) [1]. Estas variables han estado habitualmente en conflicto. Ello se debe a que la seguridad energética (generación) y la equidad social (satisfacción de la demanda) dependen aún de fuentes primarias fósiles, generadoras de GEI, lo cual conspira contra la sostenibilidad ambiental, por el calentamiento global asociado a estos gases.

La aplicación de los análisis de riesgo se ha extendido a múltiples sectores de la tecnología y la sociedad. Precisamente, en el terreno de la sostenibilidad energética se ha descubierto una oportunidad de empleo, de manera integrada, de los análisis de riesgo. Como muestra esta investigación, dichos análisis ofrecen los siguientes alcances: apoyar la decisión de las gobernanzas respecto a políticas sostenibles de desarrollo energético; contribuir a la modelación del efecto de las fuentes renovables de energía (FRE) sobre los factores relacionados con el riesgo climático objetivo; y aportar criterios trascendentes a las decisiones técnico económicas, en cuanto al empleo confiable de dichas fuentes.

Todo ello está enmarcado en la conceptualización del riesgo desarrollada por el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático /PICC/ [2]. Desafortunadamente, dicha conceptualización no significa implementación. Como muestra este estudio, las técnicas desarrolladas para implementar estos alcances son diversas, pero amparadas en una filosofía similar de optimización, todo lo cual se sistematiza en el sistema propuesto, el que resume las capacidades de los análisis de riesgo para apoyar decisiones de carácter social, económico y técnico respecto a la sostenibilidad energética. El objetivo principal de esta investigación es desarrollar y aplicar una metodología de análisis integral de riesgo que apoye los estudios de sostenibilidad energética respecto al diseño de acciones de adaptación y estrategias de mitigación del cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Visión del riesgo según el PICC

La figura 1, ilustra la visión del riesgo asociado al cambio climático, desarrollada por el PICC en sus más recientes informes, donde se muestra que dicha variable tiene una dependencia multifactorial [2]. El riesgo aparece ligado a una serie de factores de origen natural y antropogénico (variabilidad natural y cambio climático antropogénico), donde se vinculan variables que afectan directamente a los peligros (huracanes, sequías, inundaciones, otros) y otras de carácter económico– social (procesos socioeconómicos, acciones de adaptación – mitigación, gobernanza), que afectan a los factores relacionados con la vulnerabilidad y la exposición.

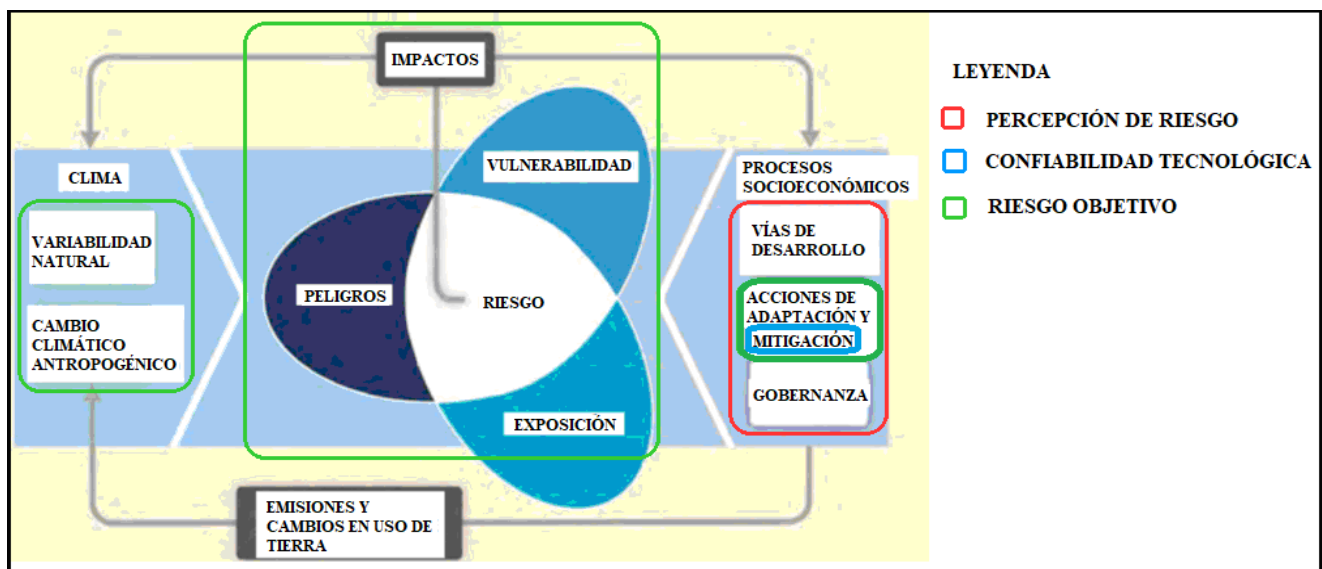


Fig. 1. Ilustración del riesgo de cambio climático según PICC [2].

Las variables de carácter económico social pueden generar, a través de sus desempeños, emisiones de GEI y cambios en el uso de la tierra, lo cual alimentará al cambio climático antropogénico. El enlace de variables que afectan al riesgo, hacen que el mismo genere impactos, los cuales afectan al propio clima y también a las variables de carácter económico-social. El lazo de dependencias mostrado puede optimizarse empleando herramientas de análisis de riesgo. El estudio del desempeño de las variables de tipo económico-social depende de factores subjetivos, los que están asociados a la percepción de los riesgos que el cambio climático implica para sus actores (gobierno y sociedad).

Las decisiones que emanan de estas variables afectan al riesgo objetivo, ya sea por los peligros incrementados por el cambio climático antropogénico, o por las variaciones de vulnerabilidad y exposición que imponen las estrategias de desarrollo, al entorno humano y natural. Adicionalmente, el desempeño de las acciones de mitigación a través de la introducción de energías renovables, se beneficia de los estudios de confiabilidad tecnológica. El código de colores mostrado en la figura ilustra el abordaje de los diferentes factores incluidos en el gráfico, por los métodos declarados en el artículo.

Enfoque metodológico del estudio de riesgo subjetivo asociado al cambio climático

El diseño metodológico para realizar los estudios de riesgo subjetivo (percepción de riesgo) se basa en variables y encuestas. Dichas variables permiten fragmentar el pensamiento, en este caso, sobre el riesgo del cambio climático [3]. El algoritmo (informatizado con el código RISKPERCEP Ver 2.0) mediante el cual se realizan estos estudios, se presenta en la figura 2.

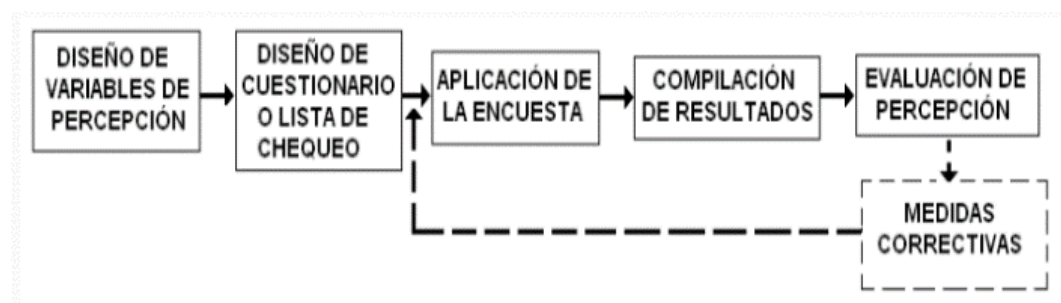


Fig. 2. Algoritmo de estudio de percepción de riesgo [3].

En el diseño de variables de percepción se han empleado las relacionadas con riesgos psicosociales, que son de tres tipos: las concernientes al individuo, las referidas a la naturaleza del riesgo o riesgo físico y las asociadas con la gestión del riesgo o riesgo gestionado. El cuestionario se prepara para investigar las variables. En este caso específico, fue adaptado a la investigación de temas de sostenibilidad energética. Para la evaluación se emplearon preguntas cerradas cuyas respuestas están ordenadas de manera unipolar creciente en tres gradaciones, con lo que se logra una correlación con la escala de percepción de riesgo asociada. Dicha escala cuenta con tres niveles, donde 1 significa subestimación del riesgo y 3 sobrestimación, siendo el nivel 2 la estimación adecuada de riesgo. La aplicación del cuestionario debe ser realizada utilizando un formato de planillas que permite el marcado de las opciones de respuestas prediseñadas.

La evaluación de percepción de riesgo se basa en la aplicación de indicadores promediados a nivel de variable, de encuestado y por grupo de estudio. Los resultados se muestran en forma analítica y gráfica. Las medidas correctivas son el corolario de la interpretación de los resultados y se basan en la determinación de los contribuyentes más importantes. El estado de la percepción de riesgo deberá reevaluarse, pasado un período de aplicación de las medidas deducidas, para comprobar su efectividad.

Enfoque metodológico del estudio de riesgo objetivo asociado al cambio climático

Las tareas para realizar el estudio del riesgo global objetivo asociado al cambio climático son [4]:

1. Diseño del patrón conceptual sistémico de riesgo climático global.
2. Desarrollo de ecuación estructurada de riesgo global
3. Diseño de matriz de peligro vs. vulnerabilidad adaptada a las escalas previstas por el PICC.
4. Desarrollo de patrones de riesgo a escala global y regional, siguiendo los enlaces Peligro-Vulnerabilidad-Acciones de Adaptación previstos por el PICC
5. Calibración de patrones de riesgo según pronósticos del PICC
6. Introducción de información en sistema simulador de riesgos y realización de estudios multivariados

Es imprescindible aclarar, que el sistema diseñado para estos estudios parte del reconocimiento de los postulados sobre el calentamiento global emitidos por el PICC. El estudio de riesgo objetivo asociado al cambio climático impone el reto de incluir todos los factores influyentes en el riesgo climático global en una ecuación de riesgo. El patrón conceptual sistémico de riesgo global consiste en representar, esquemáticamente (ver figura 3 izquierda), que cualquier sistema (SISTEMA X) tendrá peligros (PRE1) asociados (huracanes, nivel del mar, deshielos, sequías, inundaciones, otros), a los cuales corresponden vulnerabilidades (VUL1) y posibles medidas de adaptación (ADA1 – compensatorias de las vulnerabilidades), ambas adaptadas a los peligros. Este sistema está afectado por variables globales (naturales y antropogénicas), en las que las segundas (GLOBAL) pueden ser compensadas con medidas de mitigación (MIT). El comportamiento de estas variables provocará diferentes niveles de riesgo para el sistema.

Una matriz de Peligro vs. Vulnerabilidad (Riesgo) adaptada de las escalas previstas por el PICC, se muestra en la figura 3 (derecha). Los colores representan diferentes valores de riesgo (ver leyenda de la matriz). En la matriz se identifican tres franjas, en color rojo se aprecian los riesgos más elevados (evidente y muy alto), mientras que en la zona amarilla están los medianos (altos, medios y bajos). La zona verde y blanca contiene los riesgos menores (muy bajos e insignificantes). Los colores sirven para ilustrar en las tablas y los mapas, los niveles de riesgo que se alcanzan, dada una combinación de factores (afectados o no) en la ecuación global.



Fig. 3. Patrón conceptual sistémico de riesgo global y matriz de riesgo asociada [4].

Partiendo del estudio detallado de la figura 3 (izquierda), una ecuación adecuada para describir este riesgo del sistema será: Vea ecuaciones (1) y (2).

$$Rsist = GLOBAL \cdot MIT \cdot \sum_{i=1}^n Ri \quad (1)$$

$$Ri = Pi \cdot VULi \cdot ADAi \quad (2)$$

Donde: *Rsist* representa al riesgo del SISTEMA X, *GLOBAL* es el calentamiento antrópico, *MIT* son estrategias de mitigación (ambos globales), *Ri* son los riesgos posibles dentro del sistema, *Pi* son los peligros climáticos locales, *VULi* y *ADAI* son, respectivamente, las correspondientes vulnerabilidades y acciones de adaptación.

El método prevé un estado inicial en el que ningún elemento del sistema está afectado. El usuario afecta (o activa) cualquier elemento de la ecuación y provoca desviaciones, que se cuantifican según la matriz de riesgo. El comportamiento del riesgo del sistema *Rsist* estará definido por el mayor de los varios riesgos *Ri* modelados dentro del mismo. Cada *Ri* será calculado según la combinación de los factores evidentes (simulados por el usuario) con los compensatorios.

Por ejemplo, *GLOBAL* será gradualmente más importante, mientras mayor es el calentamiento global (predefinido como 0.6, 1, 2 y 4 °C respecto a 1990). *MIT* será compensatorio para *GLOBAL*, mientras no se afecte alguna opción de mitigación (fallos por fuentes de GEI por ENERGIA o NO ENERGIA). Un peligro *Pi* evidente, será más complejo si existe una *VULi* asociada, también evidente. Si la *ADAI* correspondiente compensa a la *VULi*, los niveles de riesgo serán menores. Para combinaciones en los que se afecten solo las variables compensatorias (*MIT* o *ADAI*), se detectan solo riesgos potenciales (bajos). Estos se hacen más elevados solo cuando se hacen evidentes los peligros, vulnerabilidades y/o calentamientos globales correspondientes. De esta forma, la ecuación determina mayores niveles de riesgo mientras más factores evidentes se incorporen en la misma.

Para desarrollar los patrones de riesgo a escala global, se consultó una gran cantidad de información que reúne acoplamientos de peligros, vulnerabilidades, acciones de adaptación y pronósticos de riesgo por grado de calentamiento para diversas zonas del mundo [2]. Estos datos fueron adaptados a mapas y tablas para mostrar las combinaciones y acoplamientos entre estos contribuyentes. Los contribuyentes se codifican con caracteres alfanuméricos familiares, para lograr su gestión informatizada.

La gestión de la información se realiza a través del código simulador SIMENI-CC, que almacena todos los datos anteriormente acopiados en sus bases analíticas y gráficas [4]. Una vez sistematizados, las matrices y mapas almacenados en los archivos soporte del código, se convierten en bases de conocimientos sobre el riesgo climático (adaptadas para escalas global y regional). En el caso de un escenario regional (como el de Cuba), el diseño de los patrones requiere la consulta detallada de documentos actualizados sobre riesgos, impactos y vulnerabilidades asociados al cambio climático.

La escala regional se documenta en base a la información disponible en cada país [5,6]. Los casos de Honduras y República Dominicana, muestran extensiones hacia otros escenarios regionales. Los niveles de riesgo deducidos desde la matriz de Peligros vs. Vulnerabilidad (figura 3, derecha) no pueden reproducir exactamente el comportamiento que en la realidad se observa. Por ello, es necesario emplear, como calibraciones (correcciones), los pronósticos de riesgo por regiones considerando el calentamiento global [2]. Los resultados obtenidos, tras cualquier ejercicio con SIMENI-CC, pueden ser debatidos entre expertos y decisores, en base a una amplia base informativa, facilitada dentro del manual de usuario y los tutoriales del sistema.

Enfoque metodológico del estudio de confiabilidad tecnológica para las FRE

Los análisis de confiabilidad consultados sobre FRE han sido los aplicados, específicamente, a la energía eólica. Estos han comprendido varios frentes: la investigación de históricos de fallos para diferentes partes componentes de los aerogeneradores o máquinas completas, algunas aplicaciones puntuales para análisis de riesgo y análisis probabilista de variables meteorológicas. En principio, algunas de estas aplicaciones, constituyen un buen antecedente para esta investigación, aunque no satisfacen las expectativas de un análisis de fiabilidad integral [7].

Los estudios cuantitativos de confiabilidad y riesgo son herramientas adecuadas para identificar los principales contribuyentes a la disponibilidad y a la seguridad de las instalaciones. Los mismos se han empleado en sectores como la aeronáutica, la industria aeroespacial, la energética nuclear, la industria química y la petroquímica. Sus aplicaciones han sido demostradas en la optimización del diseño, operación, garantía de calidad y otras áreas [8].

El algoritmo mediante el cual se desarrollan los análisis de confiabilidad de FRE, en este caso específico para campos eólicos en Cuba, aparece representado en la figura 4 [7].

El estudio de las máquinas aerogeneradoras de los parques existentes en el país, unido a la información estadística recopilada en los emplazamientos, permitió establecer un aerogenerador de tipo genérico que posibilitó realizar análisis comparativos entre las tecnologías disponibles en Cuba. Este aerogenerador genérico fue la base para preparar árboles de fallos por máquina y a nivel de los parques.

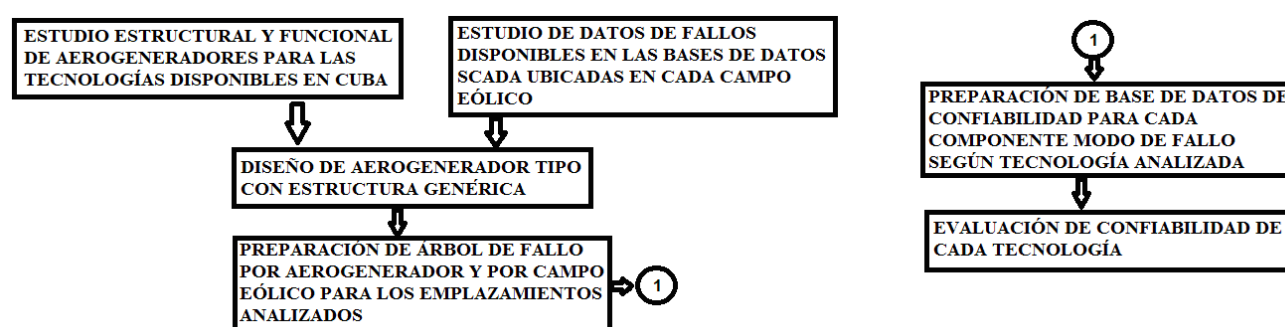


Fig. 4. Algoritmo de estudio de confiabilidad tecnológica de campos eólicos [7].

La disponibilidad de registros de fallos de partes componentes de las máquinas aerogeneradoras, acopiados durante un mínimo de 2 años (en algunas instalaciones se logró acopiar varios años) en los parques en explotación a través de sistemas SCADA, unido a otras informaciones estadísticas de nivel mundial, son los fundamentos para la obtención de las bases de datos que se emplearon para los análisis de cada emplazamiento.

Con los datos de árboles de fallos y bases de datos de confiabilidad por parque, se desarrollaron estudios específicos que reflejaron las particularidades de la disponibilidad técnica de cada emplazamiento. El código utilizado para estos estudios fue el software MOSEG [7], el cual permitió la introducción de la información sobre árboles de fallos y datos de confiabilidad, así como su solución y desarrollo posterior de aplicaciones.

Enfoque metodológico integrador de los análisis de riesgo como soporte a los estudios de sostenibilidad energética

La aparente independencia de los métodos ilustrados para estudios de riesgo objetivo y subjetivo asociados a la sostenibilidad energética, desaparece a nivel funcional, con las obligadas interrelaciones que afloran entre sus resultados. Este aspecto se aprecia más claramente, si se visualiza la figura 1.

Por ejemplo, la percepción de riesgo diagnostica el comportamiento de la sociedad y los decisores, incluida la gobernanza, respecto a la aceptación o rechazo social de las medidas relativas al desarrollo energético (uso de FRE, impactos socioeconómicos, generación distribuida, impactos medioambientales, etc.). Como resultado de ello, se producen cambios en el riesgo objetivo, al modificarse las acciones de adaptación y mitigación, las cuales se ven implementadas, a través de políticas gubernamentales de desarrollo sostenible, como campañas de comunicación y capacitación, programas sociales, tarifas escalonadas, uso de redes inteligentes, incremento de eficiencia energética, nuevas instalaciones basadas en FRE, entre otras. Ello impacta entonces en las emisiones de GEI, específicamente, en el cambio climático de origen antropogénico. De esta forma, los cambios del riesgo climático objetivo coadyuvan, a su vez, estudios de alternativas de mitigación. El desarrollo de estudios de confiabilidad tecnológica es un tema específico relacionado con estas alternativas, lo que significa la determinación de los esquemas de FRE de más alta disponibilidad, cuestión que conduce también a menos emisiones de GEI. A través de esta lógica, los modelos están claramente interconectados ocurriendo que los resultados generados en cuanto a riesgo subjetivo afectan los de tipo objetivo y viceversa. El carácter genérico de las variables empleadas en los modelos facilita la implementación práctica de los estudios, las interconexiones entre métodos y las comparaciones de resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudios de percepción de riesgo aplicados al análisis de la sostenibilidad energética

La percepción de riesgo ha sido un tema frecuentemente abordado por los expertos del PICC [2], ya que las formas de pensar de las comunidades y gestores son factores esenciales a tener en cuenta para la aceptación o rechazo de las políticas de las gobernanzas (medidas de adaptación y mitigación para atenuar este fenómeno global) [2,3]. La toma de conciencia sobre estos fenómenos derivados del desarrollo de la civilización, así como la adopción de medidas oportunas, pueden constituir un freno al aporte negativo que la humanidad está ejerciendo sobre las posibilidades de supervivencia de las futuras generaciones.

Dos trabajos previos de percepción de riesgo sobre cambio climático fueron empleados para respaldar esta aplicación a la sostenibilidad energética. Estos son; el estudio de percepción de riesgo sobre el cambio climático auspiciado por la UNESCO en el sector educacional en Cuba [3], y el estudio promovido por la Universidad Zamorano para universidades hondureñas [9].

En el primer caso, la metodología descrita fue aplicada a un grupo humano formador de la sociedad cubana, para establecer medidas que posibilitan adecuar los planes docentes al diagnóstico derivado del análisis. El objeto de estudio de la investigación lo constituyeron 47 escuelas cubanas asociadas a la UNESCO, en las cuales se aplicó una encuesta especializada a 75 dirigentes y 1061 profesores [3]. Respecto al segundo estudio y con similares objetivos, se aplicó igualmente un cuestionario especializado a 457 profesores de universidades hondureñas [9].

Para emplear la compilación de respuestas adaptada a los objetivos de esta aplicación, se tomaron de [3,9] sólo las preguntas y variables de interés para la sostenibilidad energética. A continuación, se aprecian las variables de percepción de riesgo consideradas en el estudio, así como los temas de sostenibilidad investigados en el cuestionario. Las variables empleadas en el estudio fueron: capacidad de control sobre el riesgo (CONT) a través de temas en la encuesta sobre FRE y posturas de los estados frente al cambio climático; comprensión del riesgo (COMP) considerando conceptos de desarrollo sostenible y nivel de preparación teórico y metodológica sobre cambio climático; potencial catastrófico del riesgo (CATA) indagando sobre tipos y nivel de los impactos del cambio climático; reversibilidad de las consecuencias (REVE) preguntando sobre el papel de los estados en el diseño de políticas; beneficios de la exposición (BENE) e Inequidad Riesgo-Beneficio (RI-B) cuestionando los beneficios del desarrollo tecnológico a costa de los daños medioambientales; y clima organizacional en que se gestiona (CLIM) a través de preguntas sobre los contenidos impartidos y bases de datos y materiales disponibles sobre cambio climático, adaptación, mitigación y desarrollo sostenible.

La figura 5 muestra los perfiles de riesgo percibido, obtenidos para dirigentes y profesores de la red de escuelas asociadas a la UNESCO en Cuba, así como el obtenido para el caso de las universidades hondureñas. En el eje de las abscisas de la gráfica aparecen las variables de percepción evaluadas para cada grupo investigado, mientras que el eje de las ordenadas, los valores Score de percepción de riesgo a nivel de grupo para cada variable. En el extremo derecho se ilustra el valor de Score grupal. Las líneas quebradas permiten la valoración comparativa del riesgo percibido entre los grupos evaluados.

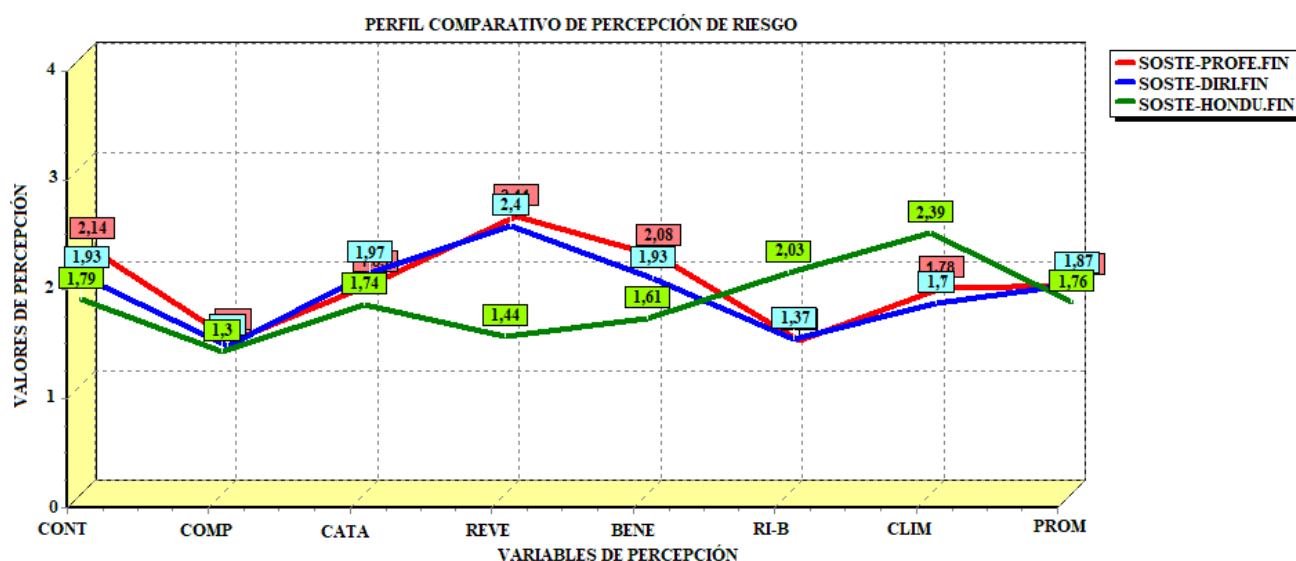


Fig. 5. Perfil comparativo de riesgo percibido entre grupos humanos considerados en los estudio [3, 9].

Aunque siempre subestimando el riesgo, resulta mejor la percepción de riesgo entre los dirigentes (1.87), respecto a los profesores (1.81) en el grupo cubano. En relación al estudio hondureño, se aprecia una mayor subestimación del riesgo (1.76). De la figura se deduce que no existen diferencias apreciables de percepción de riesgo entre los grupos estudiados, para el caso de Cuba, lo que matiza un ambiente coherente respecto al tema en los profesores y dirigentes, así como un nivel de comunicación muy adecuado entre los mismos. Lo mismo ocurre respecto a algunas variables del estudio hondureño. Para todos los casos, se aprecian coincidencias en las variables COMP y CATA. Se mantienen cercanas en sus valores, en el estudio cubano REVE, BENE, RI-B y CLIM, mientras que las mismas se alejan, con tendencia opuesta, en el estudio hondureño. Las coincidencias sobre la variable COMP muestra una paridad de opiniones en las cuestiones conceptuales y el nivel de preparación de los grupos estudiados. La variable CATA también demuestra similitud de criterios respecto a los impactos del cambio climático. Resultan más conservadores los profesores cubanos sobre el rol de los estados para revertir (REVE) el cambio climático y los mecanismos de sostenibilidad, la consideración de los beneficios tecnológicos (BENE) respecto a los daños medioambientales y el peor clima para la enseñanza (CLIM) de los temas del cambio climático y el desarrollo sostenible.

Debe destacarse que este estudio fue realizado sobre la base de opiniones en grupos no especializados en la temática de sostenibilidad energética; sin embargo, se estudiaron aspectos que abarcan, de manera más o menos directa, la sostenibilidad ambiental, la equidad social y la seguridad energética [1]. Estas cuestiones constituyen centro de atención de la sociedad y la gobernanza, y deben adecuarse de forma que las acciones de adaptación y las estrategias de mitigación sean comprendidas y aceptadas por estos grupos humanos.

Simulación del riesgo asociado al cambio climático ante diversas estrategias de desarrollo energético

Para ilustrar las capacidades del simulador de riesgos del cambio climático durante la evaluación de estrategias de mitigación (en lo que a energía se refiere), se ha tomado un caso de estudio para el escenario global. En este caso, se han conjugado un peligro (HURACAN), una variable de calentamiento global de origen antrópico de 2 °C (GRADO-2°C) y una situación de vulnerabilidad por inundación (FLOOD-STRESS). Este mismo caso de estudio ha sido corrido, pero agregando una mala gestión de la energía (fallo de mitigación ENERGIA). Ambas situaciones se presentan en la figura 6 [4].

Como se observa (ver tablas en parte superior de la figura), la inadecuada mitigación a través de una incorrecta gestión de la energía eleva a ALTO el nivel de riesgo en varias zonas del mundo (ASA-Asia, NOR-Norteamérica), lo que se traduce en similar riesgo para el mundo (CLI - Clima mundial), mientras que una buena gestión mantiene este riesgo en nivel MEDIO. Un mapa global ilustrativo de distribución de peligros, vulnerabilidades y riesgos ante mala gestión energética se presenta en la parte inferior de la figura. El código de colores empleado responde a la matriz de riesgo ilustrada en la figura 3.

De esta forma, el simulador se convierte en una herramienta adecuada para reproducir cualquier combinación requerida de variables globales y locales, estudiar sus efectos para el riesgo climático y debatir sobre las medidas para resolver las situaciones observadas.

La revisión bibliográfica realizada [4], muestra que el modelado del nivel de riesgo climático de manera directa, constituye una novedad frente a los sistemas de estudio disponibles (Cimate Bathtub, Climate Momentum, PRECIS, entre otros), los que analizan el riesgo climático indirectamente.

La preocupación por el desarrollo de alternativas energéticas limpias se muestra claramente en los estudios de combinaciones de fuentes primarias de energía en China, en las que prevalecen las FRE [10]. Para algunos grandes emisores, resultan más evidentes los desarrollos respecto a mejoras de la eficiencia energética que los de grandes inversiones respecto a cambios de fuentes primarias de energía [11]. Estas alternativas pueden ser representadas genéricamente en el simulador.

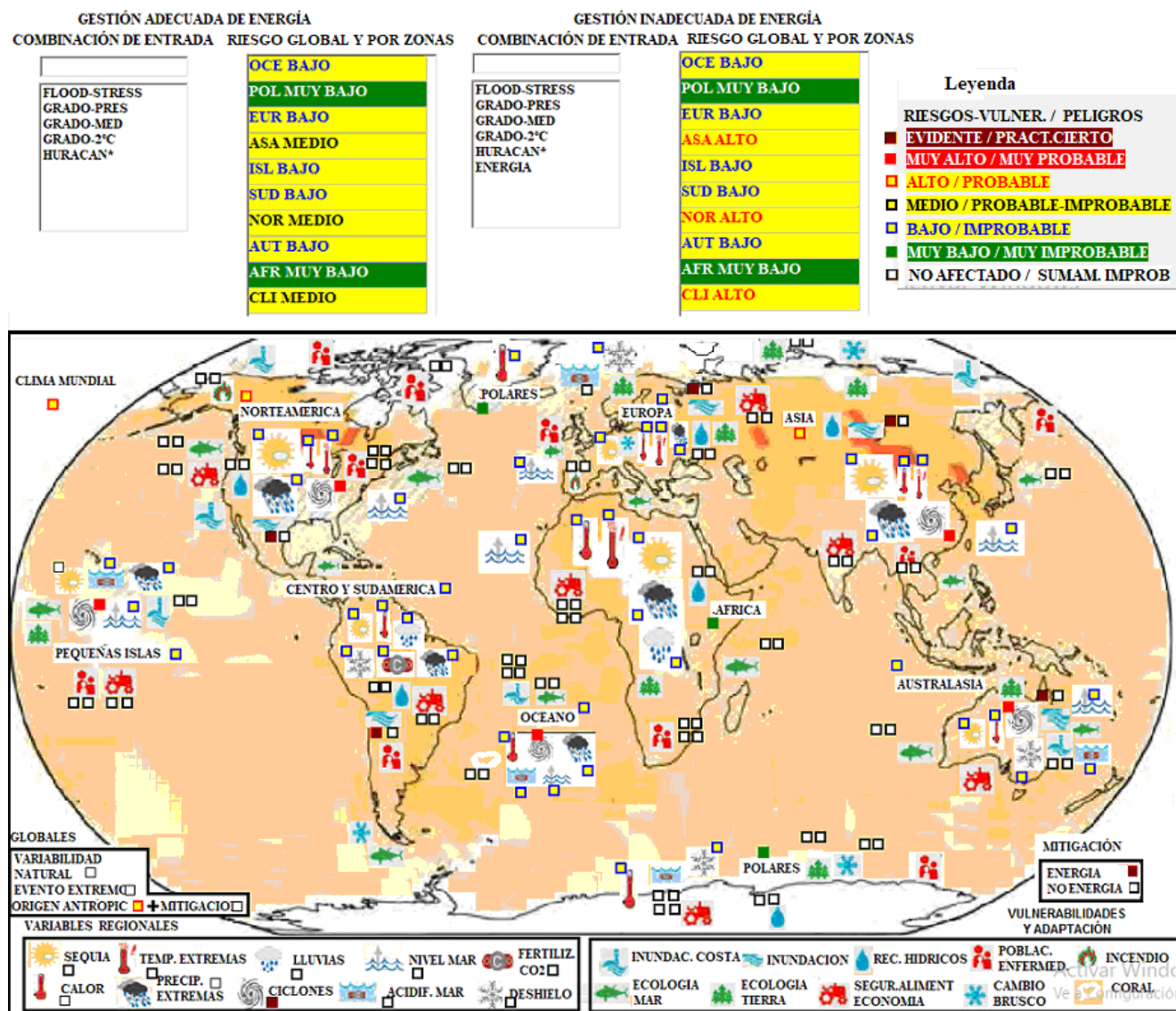


Fig. 6. Caso comparativo de gestión energética en escenario global [4].

Estudio de confiabilidad tecnológica de parques eólicos en Cuba

El pronóstico de crecimiento de energía eólica en Cuba prevé que, para el 2030, más de 600 MW eléctricos provengan de esta fuente de energía [7]. Dadas estas perspectivas de crecimiento, es esencial conocer cuál de las tecnologías probadas ha sido la más adecuada en cuanto a su empleo en el sistema electroenergético nacional.

El árbol de fallos empleado para modelar los parques se presenta en la figura 7. La posibilidad de representar todos los parques con el mismo árbol de fallos radica en la similitud de cantidad de máquinas (6), de cada parque y en el ajuste, ya explicado, de todas las tecnologías a un aerogenerador genérico. La aproximación considerada para evaluar la disponibilidad del parque es que se admite sólo una máquina fuera de servicio (lógica 2 de 6). El subárbol desarrollado en la parte derecha de la figura es adaptable a cualquiera las máquinas del subárbol izquierdo, sustituyendo el carácter # por el número de máquina modelada [7].

En el momento del estudio, coexistían en Cuba tres tecnologías eólicas (A, B y C). La tabla 1, resume el esfuerzo realizado, tras el procesamiento de decenas de miles de registros de cada parque, almacenados en los sistemas SCADA de los emplazamientos. El código genérico de cada componente reflejado en la columna 3 de la tabla 1, corresponde a los sucesos ilustrados en el árbol de fallos de la figura 7 (parte derecha).

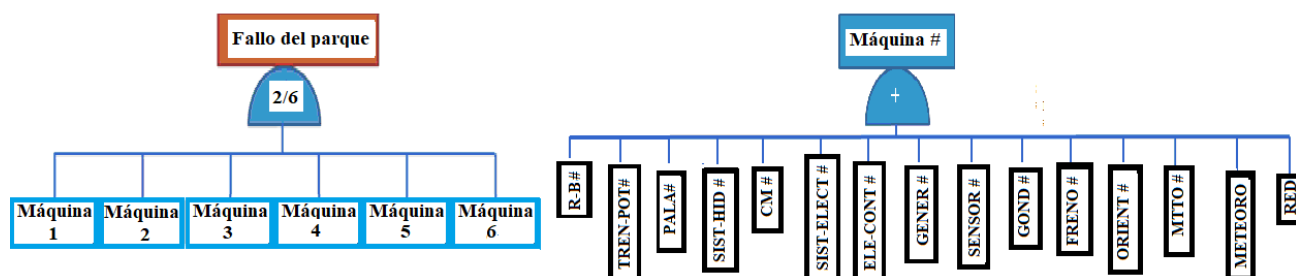


Fig. 7. Árbol de fallos para estudio de confiabilidad tecnológica de parques eólicos [7].

Tabla 1. Fragmento de bases de datos de confiabilidad para diferentes tecnologías eólicas					
No	Componentes Principales	Código genérico	Tecnología		
			A	B	C
1	Rotor + Buje	R-B	4.02e-4	2,85E-6	2,85E-6
....					
4	Sistema Hidráulico	SIST-HID	7.3E-5	1,71E-4	4,13E-2
....					
7	Electrónica de Control	ELE-CONT	1,24E-3	4,8E-3	7,19E-2
....					
11	Sistema de Frenos	FRENO	1,09E-4	2,28E-6	9,21E-2
12	Sistema de Orientación	ORIENT	3,65E-5	1,9E-5	1,88E-1
13	Mantenimiento de máquina	MTTO	Q=4E-3	Q=2,4E-3	Q=3,61E-3
14	Manipulación o afectación de red	RED	Q=7,8E-3	Q=1,7E-2	Q=9,92E-3
15	Eventos meteorológicos	METEORO	Q=1,3E-2	Q=4,2E-2	Q=6,45E-2

Las bases de datos de confiabilidad contienen las tasas de fallos asociadas a las partes predefinidas de cada máquina. Las indisponibilidades Q se calcularon teniendo en cuenta la fracción de indisponibilidad de los equipos respecto al tiempo de explotación de cada parque. En el caso de los mantenimientos se asignaron a nivel de aerogenerador, mientras que los eventos meteorológicos y los fallos de la red se atribuyen a cada parque.

Tras los estudios de confiabilidad de los emplazamientos, los resultados para los principales contribuyentes reflejan la importancia de los eventos meteorológicos extremos y de los fallos de la red en cualquiera de los casos. Considerando que tales contribuciones son ajenas a las tecnologías, se realizó un estudio más detallado de cada máquina según su tecnología. Las distribuciones de fallos para las tres tecnologías se muestran en la figura 8.

Los estudios de confiabilidad realizados demostraron que: por su disponibilidad global la tecnología B resulta la más adecuada; deben ser considerados como muy importantes los fallos de los contribuyentes RED y METEORO y la contribución relativa de fallos por máquina es un elemento de decisión trascendente. Una aplicación fundamental de este estudio fue su contribución al análisis técnico-económico durante la selección del tipo de tecnología idónea para el futuro desarrollo eólico del país. Adicionalmente, los resultados mostrados pueden servir a la selección de emplazamientos futuros así como al mejoramiento de las políticas de explotación de los parques. El método mostrado puede generalizarse para otras FRE.

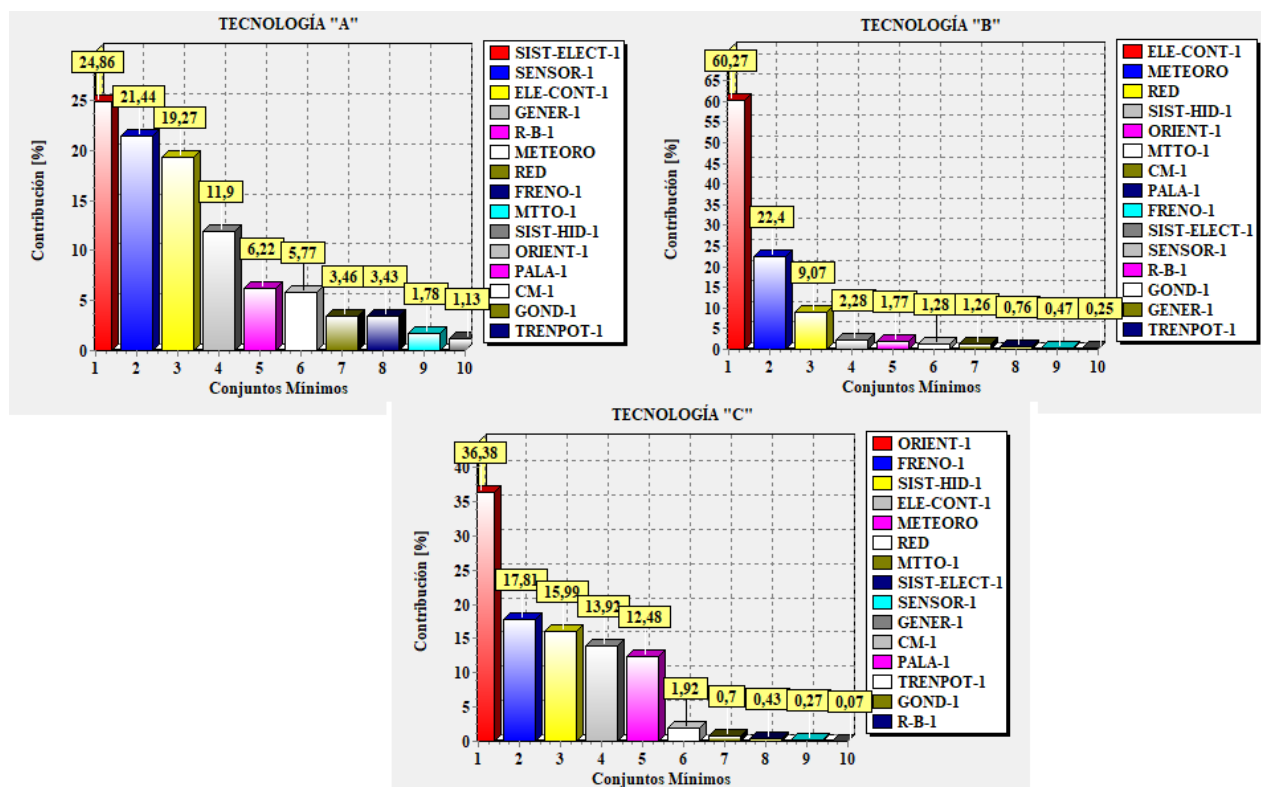


Fig. 8. Distribución de fallos por máquina para tecnologías A, B y C.

Ejemplo de empleo de los análisis de riesgo como soporte de estudios de sostenibilidad energética en Cuba

Dada la cronología con que fueron desarrollados los estudios anteriores, unido a la intencionalidad de su acoplamiento, fueron determinándose interrelaciones que los convierten en un ejemplo ilustrativo de su integralidad para apoyar la sostenibilidad energética, siendo los primeros (sobre riesgo subjetivo), fundamento de los posteriores (riesgo objetivo y confiabilidad tecnológica). Estos estudios se interconectan de la siguiente forma:

1 - Proyecto sobre conocimiento del cambio climático auspiciado por la UNESCO en el sector educacional en Cuba (2014-2015) [3]. Este proyecto creó las bases para los estudios de percepción de riesgo asociados a sostenibilidad energética, los cuales demostraron la baja percepción del riesgo respecto al rol de la energía como principal emisor de GEI a nivel mundial. En sus resultados predominaron una poca comprensión sobre el calentamiento global, un bajo sentimiento de reversibilidad asociado a los mecanismos de acuerdo internacional para controlar el fenómeno y un inadecuado soporte respecto al clima para la enseñanza del tema en Cuba. El escenario de riesgo subjetivo descrito fundamentó el rediseño de los programas de enseñanza de estos temas unido a la creación de bibliografías especializadas [3]. Tales hechos constituyen acciones de adaptación derivadas del estudio de riesgo subjetivo declarado.

2 - Proyecto Nacional "Análisis de confiabilidad tecnológica de parques eólicos en Cuba" (2014-2016), ejecutado en el marco del "Programa Nacional para Desarrollo Energético Sostenible Basado en FRE" [4,7]. El estudio referido en 1, sirvió de base al proyecto nacional enunciado, al descubrir falencias en la comprensión de los mecanismos de integración de peligros climáticos, vulnerabilidades y medidas de adaptación-mitigación del calentamiento global. Por ello, como una acción de adaptación necesaria, en el marco de este proyecto se propuso el diseño y programación del sistema SIMENI-CC [4]. El simulador SIMENI-CC ha sido utilizado, como complemento, en la formación de personal involucrado en el programa nacional referido. Además SIMENI, al evaluar los fallos en la adaptación y mitigación, ha respaldado las necesidades de desarrollo de las FRE, como alternativa de disminución de emisiones de GEI. Como objetivo central del proyecto nacional, se realizó el estudio de confiabilidad tecnológica de parques eólicos [7], significando un aporte a la estrategia nacional de mitigación del cambio climático y un soporte en las decisiones técnico económicas sobre sostenibilidad energética.

CONCLUSIONES

Los análisis de riesgo constituyen una oportunidad novedosa para apoyar los estudios de sostenibilidad energética. Su implementación abarca áreas de riesgo subjetivo y objetivo, las que permiten estudiar y optimizar variantes de acciones de adaptación y estrategias de mitigación asociadas al cambio climático. La experiencia acumulada y los códigos de respaldo garantizan la generalización de estas capacidades de estudio.

El enfoque integral de la metodología propuesta se manifiesta en su implementación a nivel funcional, que se comprueba en la interrelación de sus resultados sobre las diferentes áreas abordadas, ya sean los diagnósticos a través del riesgo subjetivo o la implementación de estudios de riesgo objetivo y de confiabilidad tecnológica. El sistema de estudios presentado en el artículo tiene, como ventaja adicional, su carácter recursivo, ya que durante el desarrollo de los ejercicios se producen resultados que generan cambios en los datos de entrada de los modelos, los cuales pueden ser nuevamente corridos para cuantificar el efecto de las modificaciones realizadas.

Los estudios de percepción de riesgo permiten analizar aspectos perceptuales y comportamentales de grupos poblacionales y decisores sobre sostenibilidad ambiental, equidad social y seguridad energética. El uso de simuladores, como el mostrado, contribuyen al desarrollo de ejercicios que capacitan a los decisores sobre los factores más trascendentes de la energía en su relación con el calentamiento global. Finalmente, las opciones de evaluación de confiabilidad tecnológica de FRE son un valor agregado a la toma de decisión sobre alternativas de sostenibilidad energética.

REFERENCIAS

- [1] SAMANES PASCUAL, J. "Energía Sostenible Sin Malos Humos". Universidad Politécnica de Navarra, España, p. 468. 2019. ISBN: 978-84-9769-353 [Citado: 30 de mayo de 2021] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/337674201_Energia_sostenible_Sin_malos_humos
- [2] IPCC, "AR6 Climate Change 2021: Impacts, Adaptation and Vulnerability". The Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report, 2021 [Citado: 30 de mayo de 2021] Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- [3] TORRES, A., et al. "Estudio de percepción de riesgo asociado al cambio climático en el sector educacional". Revista Cubana de Salud y Trabajo 2017; vol. 18, n. 1, p. 3-13. ISSN 1991-9395 [Citado: 30 de mayo de 2021] Disponible en: <http://www.revsaludtrabajo.sld.cu/index.php/revsyt/article/view/1>
- [4] TORRES VALLE, A., MARTÍNEZ MARTÍN, E. "Simulador para la enseñanza interactiva del riesgo de cambio climático". Revista Cubana de Ingeniería 2015; vol. 6, n. 3, p. 13-21, ISSN 2223-1781 [Citado: 30 de mayo de 2021] Disponible en: <http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/395/pdf>
- [5] INSMET. "Tercera Comunicación Nacional de la República de Cuba a la Convención Marco de las Naciones Unidas". 2020. ISBN: 978-959-300-170-0 [Citado: 30 de mayo de 2021] Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Third%20National%20Communication.%20Cuba.pdf>
- [6] PLANOS, E; VEGA, R Y GUEVARA, A. "Impacto del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba". Instituto de Meteorología, Agencia de Medio Ambiente, Ministerio de Ciencia, Medio Ambiente y Tecnología. La Habana, Cuba, 430 p. 2013. ISBN: 978-959-300-039-0 [Citado: 30 de mayo de 2021] Disponible en: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewiu1P6xtNHxAhWZlGoFHbT4DagQFnoECAIQAA&url=http%3A%2F%2Fwww.revistaccuba.sld.cu%2Findex.php%2Frevacc%2Farticle%2Fdownload%2F247%2F247&usq=AOvVaw38eXNgEBOC0Eh9eW36r3jd>
- [7] TORRES A., MARTÍNEZ E. "Evaluación de confiabilidad tecnológica del parque aerogenerador de Gibara 2". Revista Energética 2016, vol. 37, n. 1, p. 25-34 ISSN 1815-5901. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012016000100004
- [8] GUERRERO AGUIAR M., MEDINA LEON A., NOGUEIRA RIVERA D., "Procedimiento de gestión de riesgos como apoyo a la toma de decisiones". Ingeniería Industria 2020 vol. 41, n. 1. ISSN 1815-5936 https://www.researchgate.net/publication/338458162_Procedimiento_de_gestion_de_riesgos_como_apoyo_a_la_toma_de_decisiones
- [9] SUAZO L.E., TORRES A. "Percepciones, conocimiento y enseñanza de cambio climático y riesgo de desastres en universidades hondureñas". Form. Univ. 2021; vol. 14, n. 1, p. 225-236. ISSN 0718-5006 <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062021000100225>
- [10] LIU B, CHEN J, WANG H AND WANG Q. "Renewable Energy and Material Supply Risks: a Predictive Analysis Based on An LSTM Model". Front. Energy Res. 2020. vol. 8, n. 163. ISSN 1099-114X <https://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2020.00163>
- [11] KOULOLOUKOU D., et al. "Corporate climate risk management and the implementation of climate projects by the world's largest emitters". Journal of Cleaner Production. 2019; p. 238 ISSN 0959-6526 <https://www.semanticscholar.org/paper/Corporate-climate-risk-management-and-the-of-by-the-Kouloukoui-Marinho/ab68f1b502e29418fa68efd8cb06f168f542a62b>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Antonio Torres Valle: <https://orcid.org/0000-0001-9240-5977>

Diseño y programación de software empleados en la investigación. Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, trabajo estadístico, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Ulises Jáuregui Haza: <https://orcid.org/0000-0002-6943-4873>

Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, trabajo estadístico, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Bárbara Garea Moreda: <https://orcid.org/0000-0002-3625-0138>

Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Erich Martínez Martín: <https://orcid.org/0000-0001-7118-5450>

Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

Laura E. Suazo Torres: <https://orcid.org/0000-0001-7857-0140>

Participó en revisión del estado del arte, diseño y validación de modelo teórico, recolección de datos, realización de aplicaciones, trabajo estadístico, análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.