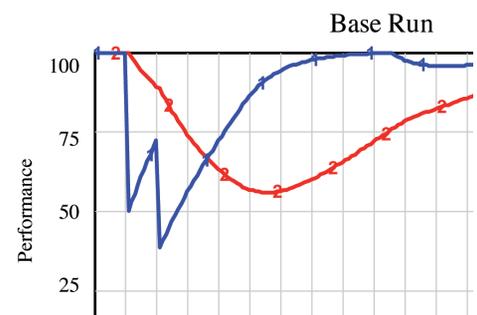


Las infraestructuras críticas, más críticas en tiempos de crisis

CRITICAL INFRASTRUCTURES, MORE CRITICAL IN TIMES OF CRISIS



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7118> | Recibido: 18/03/2014 • Aceptado: 02/06/2014

■ ■ ■ ■
Ana Laugé, Josune Hernantes y Jose Mari Sarriegi

TECNUN, Universidad de Navarra, Departamento de Organización Industrial, Pº Manuel Lardizábal 13, 20018 San Sebastián, Tfno. +34 943 219877. alauge@tecnun.es

ABSTRACT

- The dependency of society on the proper functioning of critical infrastructures (CIs) has been highlighted in recent natural disasters. CIs set up complex and interconnected systems and consequently a failure in one CI can spread to other dependent sectors. This represents a further complication in the response phase of a crisis, increasing the impact of natural disasters and seriously affecting the welfare of society. The aim of this paper is to illustrate the important role that CIs have on the propagation of the impact of a crisis. For that reason, a simulation model that represents the propagation, among interdependent CIs, of the effects of a storm on a region has been developed. This simulation model has a pedagogical purpose in which the effects of applying different crisis management policies can be simulated. This type of simulation models can represent different crisis scenarios. Therefore, simulation models can be used by managers allowing them to identify good practices and areas of improvement in face of future events.
- **Keywords:** Crisis management, impact evaluation, critical infrastructure, interdependencies, dependencies.

RESUMEN

Recientes desastres naturales han puesto de relieve la dependencia de la sociedad en el correcto funcionamiento de las infraestructuras críticas (ICs). Las ICs forman sistemas complejos e interconectados por lo que un fallo en una IC puede propagarse a otros sectores que dependan de ella. Ello supone una complicación añadida en la fase de respuesta de una crisis, aumentando el impacto y afectando seriamente al bienestar de la sociedad.

El objetivo de este trabajo es ilustrar el importante papel que las interdependencias entre ICs tienen sobre la propagación del impacto de una crisis. Para ello, se ha desarrollado un modelo de simulación que representa la propagación, entre ICs interdependientes, de los efectos de una fuerte tormenta sobre una región. El modelo de simulación desarrollado es un modelo de carácter pedagógico en el que se pueden simular los efectos de aplicar distintas políticas de gestión de crisis. Este tipo de modelos de simulación pueden representar escenarios de crisis diferentes por lo que pueden ser usados por gestores permitiéndoles identificar buenas prácticas y áreas de mejora ante futuros eventos.

Palabras clave: Gestión de crisis, evaluación de impactos, infraestructura crítica, interdependencias, dependencias.

1. INTRODUCCIÓN

El bienestar de la sociedad actual es altamente dependiente del buen funcionamiento de las Infraestructuras Críticas (ICs) [1-4]. Las ICs tales como la Energía, las Comunicaciones o el Agua se han convertido en indispensables para nuestro día a día y el fallo, por breve que sea, de alguna de ellas provoca en la sociedad desde malestar hasta desórdenes públicos o incluso fatalidades si el fallo perdura en el tiempo.

La Directiva 2008/114/CE del Consejo de la Unión Europea define IC como “el elemento, sistema o parte de éste situado en los Estados miembros que es esencial para el mantenimiento de funciones sociales vitales, la salud, la integridad física, la seguridad, y el bienestar social y económico de la población y cuya perturbación o destrucción afectaría gravemente a un Estado miembro al no poder mantener esas funciones” [5]. Esta definición destaca el importante papel que desempeñan las ICs en la sociedad y los serios problemas que pueden causar cuando un fallo afecta a una o varias ICs [2, 3, 6].

Las ICs incluidas en esta investigación corresponden a la lista del Programa Europeo para la Protección de Infraestructuras Críticas (PEPIC) (Tabla 1) [7].

Infraestructuras Críticas
Energía
Tecnologías de Información y Comunicación
Agua
Alimentación
Salud
Finanzas
Orden y Seguridad Pública y Jurídica
Administración Pública
Transporte
Industria Química y Nuclear
Investigación y Espacio

Tabla 1: Listado de Infraestructuras Críticas del PEPIC

La gestión de las ICs es una tarea complicada, ya que cada IC es, en sí misma, un elemento complejo que a su vez forma una red de elementos interconectados con el resto de ICs [8, 9]. Como consecuencia, cuando una IC falla se generan efectos en cascada que afectan a otras ICs dependientes de la primera. También se debe tener en cuenta que las dependencias e interdependencias existentes entre ICs afectan a su recuperación ya que para restablecer la actividad habitual de una IC es necesario que las ICs de las que depende funcionen adecuadamente. Por lo tanto, realizar un correcto análisis de las dependencias e interdependencias existentes entre las ICs puede ayudar a reducir las interrupciones de servicio [10], así como a mejorar la comprensión de sus impactos sobre otras ICs y de las pérdidas económicas causadas [11].

Cabe señalar que la mayoría de los autores utilizan el concepto de “interdependencia” y “dependencia” indistintamente; sin embargo, ambos conceptos no implican el mismo grado de relación entre ICs. Es decir, si dos ICs (A y B) son interdependientes, habrá un efecto bidireccional entre ambas por lo que A influirá sobre B y viceversa. Sin embargo, si A y B son dependientes el efecto será unidireccional, es decir, A será dependiente de B, pero B no se verá afectada por A. Por ejemplo, el sistema energético y el de telecomunicaciones son interdependientes ya que un fallo en una de estas ICs afecta a la otra y viceversa; sin energía las telecomunicaciones fallan y sin telecomunicaciones el sistema energético, plagado de sensores emisores de señales, no funciona correctamente. Por otro lado, encontramos un ejemplo de dependencia al analizar la industria química y el sistema financiero. Observamos que si el sistema financiero dejara de funcionar durante un tiempo la gestión de las plantas químicas podría verse afectada ya que no podrían gestionar sus pagos a proveedores, cobros de clientes, etc. Sin embargo, si las plantas químicas tuvieran que parar su producción el funcionamiento del sistema financiero no tendría por qué verse afectado. En un caso extremo en el que todas las industrias químicas tuvieran paralizada su activi-

dad, el flujo económico se reduciría pero ello no impediría al sistema financiero continuar con su actividad. En este caso la industria química es dependiente del sistema financiero pero no existe interdependencia ya que el funcionamiento del sistema financiero no depende de la industria química.

Además de la identificación de las dependencias e interdependencias entre ICs, otro aspecto importante a la hora de prepararse para gestionar eficazmente una crisis es conocer qué consecuencias se pueden producir [12] analizando no sólo los impactos directos sino también los indirectos [13]. Se considera impacto directo el daño físico que sufre la IC a causa del fenómeno natural mientras que el impacto indirecto se produce por los efectos en cascada sobre otras ICs. Las metodologías actuales para el análisis de estos impactos suelen ser incompletas e inexactas [14] ya que no incluyen la relación causa-efecto de forma que no analizan cómo algunos impactos directos pueden generar otros indirectos.

Considerando la complejidad y criticidad de las ICs, la gestión de crisis debe adaptarse a las características actuales de la sociedad incluyendo el análisis de las relaciones causa-efecto entre ellas y su entorno. Este análisis permite a los gestores conocer en qué medida las consecuencias de una IC dañada se pueden propagar a otras, afectando a su rendimiento o dificultando su recuperación, para así poder establecer políticas de prevención y respuesta.

Una herramienta que puede ayudar a mejorar la gestión de crisis es la modelización, ya que permite desarrollar modelos de simulación de sistemas complejos incluyendo una perspectiva dinámica a través del análisis de la evolución en el tiempo tanto de los impactos causados por el fenómeno como de su propagación [3, 15, 16]. Mediante la simulación de diferentes escenarios, los modelos permiten analizar la eficacia a la hora de implantar diversas políticas de gestión que ayudan a disminuir las consecuencias de un evento. Varios autores han puesto de relieve la importancia del análisis, modelización y simulación de ICs y sus dependencias e interdependencias para la seguridad tanto nacional como internacional [3, 17]. De hecho, la modelización de las dependencias e interdependencias de ICs y de la propagación de sus impactos puede ayudar a la gestión de crisis en todas sus fases, desde la prevención a la recuperación [1].

El objetivo de este trabajo es analizar el papel de las dependencias e interdependencias entre ICs a la hora de propagar los impactos indirectos, así como poner en relieve la necesidad de incluir el análisis dinámico de los efectos en cascada en la gestión de crisis. Para ello, se ha desarrollado un modelo de simulación que muestra la propagación de los impactos indirectos en ICs interdependientes y el efecto de aplicar diferentes políticas de gestión tales como el uso de generadores o la formación de los gestores.

2. ESTADO DEL ARTE

El estudio de las dependencias e interdependencias de ICs es un campo de investigación aún inmaduro [3, 15, 18-20] ya que, a pesar de que se han logrado avances en este área, todavía existen dificultades para identificar todas las dependencias e interdependencias existentes y la propagación de los impactos indirectos [21].

Con el objetivo de analizar las ICs y su papel en la propagación de los impactos indirectos se ha llevado a cabo una revisión de las metodologías actualmente utilizadas por diversos organismos internacionales así como las metodologías utilizadas en varios proyectos financiados por la Unión Europea [12]. De este estudio se concluye que las metodologías de evaluación de impactos más reconocidos a nivel internacional son CEPAL y HAZUS [13, 22]. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) desarrolló su primera versión del manual para la estimación de los impactos socioeconómicos y ambientales en 1991 y en 2003 se publicó la versión actual. Por otro lado, HAZUS es un software para estimar el impacto de los fenómenos naturales desarrollado por la *Agencia Federal de Gestión de Emergencias* (FEMA por sus siglas en inglés) de Estados Unidos, cuya primera versión fue lanzada en 1997.

Pero estas metodologías no transmiten toda la historia de cómo las crisis afectan a la sociedad y a su entorno [23]. Por lo general, el análisis de los impactos causados por los fenómenos naturales se lleva a cabo inmediatamente después del evento desencadenante para priorizar las necesidades de ayuda y rehabilitación. Por ello, el análisis se suele centrar en la cuantificación de daños físicos en infraestructuras y la estimación del número de afectados. Sin embargo, es necesario esperar un tiempo para estimar adecuadamente las consecuencias no inmediatas de una crisis [24, 25]. Además, a pesar de la criticidad de las ICs, las metodologías de evaluación de impactos como la CEPAL o HAZUS [13, 22] no dedican especial atención a analizar las ICs ni sus dependencias debido, precisamente a que están enfocadas en la fase de mitigación. Sin embargo, para mejorar la gestión de emergencias y la toma de decisiones durante todo su ciclo de vida, desde la prevención hasta la respuesta, se debe analizar el importante papel que tienen las ICs en la propagación de impactos indirectos.

En relación a la bibliografía existente sobre las ICs y sus dependencias e interdependencias, se puede encontrar información detallada sobre el funcionamiento de cada IC de forma individual y de sus dependencias directas con otras ICs. Sin embargo, a día de hoy la comprensión holística de las dependencias entre ICs sigue siendo limitada ya que los gestores no son realmente conscientes de sus dependencias indirectas, es decir, de las dependencias de las ICs de las que ellos dependen [3, 4, 26]. Por ello, por lo general, los proyectos para el análisis de dependencias e interdependencias de ICs se centran en analizar las ICs individualmente o tan sólo incluyen un par de ICs, de forma que estos análisis no ofrecen una visión completa de las ICs como sistema [1, 3, 11, 18, 21, 27], lo que dificulta conseguir mejoras en la gestión de crisis [1, 20].

Otra de las dificultades inherentes a esta área es la comprensión de las relaciones causa-efecto de los impactos. Es necesario considerar el factor tiempo ya que, debido a la complejidad de los sistemas de ICs, algunos efectos que dichas dependencias e interdependencias generan pueden ser fácilmente identificados por tener un efecto inmediato mientras que otros son más difíciles de determinar por producirse con cierto retraso [9, 28].

Estas limitaciones nos han llevado a adoptar una perspectiva global que permitirá observar todos los impactos incluyendo también los que en ocasiones quedan excluidos, como son los que se propagan a causa de los efectos en cascada en las

ICs. Este análisis dinámico ilustra el hecho de que las ICs desempeñan un papel crucial en la propagación de impactos indirectos ya que las dependencias e interdependencias existentes entre ellas provocan que los fallos en una IC se extiendan a otras. Por lo tanto, cuanto mayor sea el nivel de dependencia e interdependencia entre las ICs más prolongado y severo será el impacto total.

3. METODOLOGÍA

La modelización de ICs no es una tarea sencilla debido a diversas dificultades tales como encontrar el nivel adecuado de abstracción para su modelización. Una modelización muy detallada requeriría una cantidad ingente de información [4, 29] pero una aproximación demasiado genérica podría no aportar resultados valiosos [28]. Asimismo, diversas metodologías han sido utilizadas para la modelización de ICs y sus dependencias e interdependencias [9, 15, 20] y, aunque no existe una metodología estándar [21, 28], la modelización basada en agentes [9, 30], los modelos input-output [31-34] y la Dinámica de Sistemas [35, 36] son las metodologías más utilizadas. Se ha elegido Dinámica de Sistemas ya que permite analizar la evolución de un sistema en el tiempo y ha sido propuesta por varios autores como una herramienta adecuada para la modelización de ICs [2, 3, 9-11, 38-40]. La Dinámica de Sistemas se basa en las relaciones causa-efecto, análogas a las dependencias e interdependencias entre las ICs. Además, mediante Dinámica de Sistemas se pueden simular sistemas incluyendo variables sociales y aspectos organizativos [3, 16, 37].

En esta investigación se ha desarrollado un modelo de simulación utilizando Dinámica de Sistemas para analizar el papel de las ICs y de sus dependencias e interdependencias en la propagación de impactos indirectos. Estos modelos de simulación deben calibrarse para cada escenario real. La calibración se lleva a cabo en colaboración con los gestores quienes proporcionarán la mejor estimación de los datos a implementar en el modelo. Una vez calibrado, el modelo permitirá a los gestores analizar cómo la aplicación de políticas de prevención y respuesta puede afectar a la propagación de los efectos del evento desencadenante.

4. RESULTADOS

El modelo de simulación desarrollado en este trabajo muestra la propagación de los impactos producidos en varias ICs interdependientes causados por un fenómeno natural.

En base al trabajo de investigación llevado a cabo por Setola [26], se ha seleccionado el sector energético ya que es la IC más influyente, es decir, es la IC de la que más ICs dependen. Y con el fin de mostrar el efecto de las ICs interdependientes hemos incluido también el sector de la alimentación como segunda IC, siendo interdependiente con el sector energético.

El escenario de impacto se desarrolla en una región densamente poblada, en verano con temperaturas por encima de los 20°C y con cierto grado de aislamiento. Esta zona sufre los efectos de una tormenta, con episodios de fuertes vientos en las primeras horas (hora 10) e inundaciones posteriores pro-

vocadas por fuertes lluvias (hora 20). En la región se localizan dos ICs, una central eléctrica y una IC alimentaria dedicada a la producción y almacenamiento. Debido a ambos fenómenos naturales la planta eléctrica sufre daños en su infraestructura que causan una reducción de su rendimiento, lo cual provoca que no se pueda suministrar energía a la IC alimentaria. Tanto la producción como el almacenamiento de alimentos depende de la energía, bien para hacer funcionar la maquinaria de la línea de producción bien para mantener los productos refrigerados. Por ello, estar sin suministro durante varias horas supone parar la producción y que las cámaras frigoríficas dejen de funcionar deteriorando los alimentos de forma que no puedan ser consumidos. Si bien el efecto no es inmediato, pasados unos días (hora 96) la escasez de alimentos básicos tendrá efecto, entre otros, en el sector energético. Esto ocurre debido a la ansiedad de la población por conseguir alimentos que puede provocar disturbios, afectando a los trabajadores e impidiéndoles continuar con su actividad habitual. Mediante estas ICs se pone de manifiesto que existen impactos inmediatos mientras que otros aparecen con cierto retraso. Por ello, es necesario incluir en la gestión de crisis una perspectiva dinámica que nos permita analizar dicha evolución en el tiempo.

Aunque el modelo de simulación desarrollado muestra una simplificación de una realidad mucho más compleja, permite representar la dependencia a nivel de funcionamiento y recuperación existente entre dos ICs y con ese objetivo se ha desarrollado el modelo. El modelo se compone de cuatro niveles o stocks (representados con rectángulos), flujos y diversas variables conectadas por flechas. Todos ellos se definen mediante ecuaciones. Cada pareja de niveles representa el estado de una IC en cada instante de tiempo. Por ejemplo, el nivel "Working energy" representa el porcentaje del sector que está en funcionamiento, mientras que "Damaged energy" muestra el porcentaje que ha fallado. La suma de ambos niveles será del 100%. En cada instante de tiempo habrá cierto porcentaje en "Working energy" mientras "Damaged energy" tendrá el porcentaje restante hasta llegar al 100%. Los niveles están conectados por flujos los cuales hacen que el valor de dichos niveles varíe. Por ejemplo, el flujo "Energy repair rate" incrementa el nivel "Working energy" y al mismo tiempo reduce el nivel "Damaged energy" en la misma proporción. Por último, las variables están conectadas por flechas que simbolizan las influencias causales existentes entre ellas. Al cambiar los valores de estos parámetros el modelo genera diferentes comportamientos mediante los cuales se puede mejorar la comprensión del funcionamiento del sistema.

Para facilitar la comprensión del modelo de simulación desarrollado en este trabajo de investigación la estructura del mismo se muestra dividida en dos figuras (Figuras 1 y 2). En

ambas figuras se incluyen los cuatro niveles y sus flujos. Por un lado, la Figura 1 representa la parte del modelo correspondiente al fallo de las ICs bien por el fenómeno natural (representado por las variables "Effect of Natural Phenomenom on Energy", "Floods" y "Strong Wind") como por la propagación de los impactos indirectos debido a las dependencias para funcionar existentes entre ambas ICs ("Effect of energy on food failure" y "Effect of food on energy failure"). Por otro lado, en la Figura 2 se incluye la estructura que representa la recuperación en base a los recursos disponibles ("Total resources" y "Resources for energy") y a la dependencia para recuperarse en función del rendimiento de la otra IC ("Effect of energy on food repair", "Effect of food on energy repair", "Time to repair energy" y "Time to repair food").

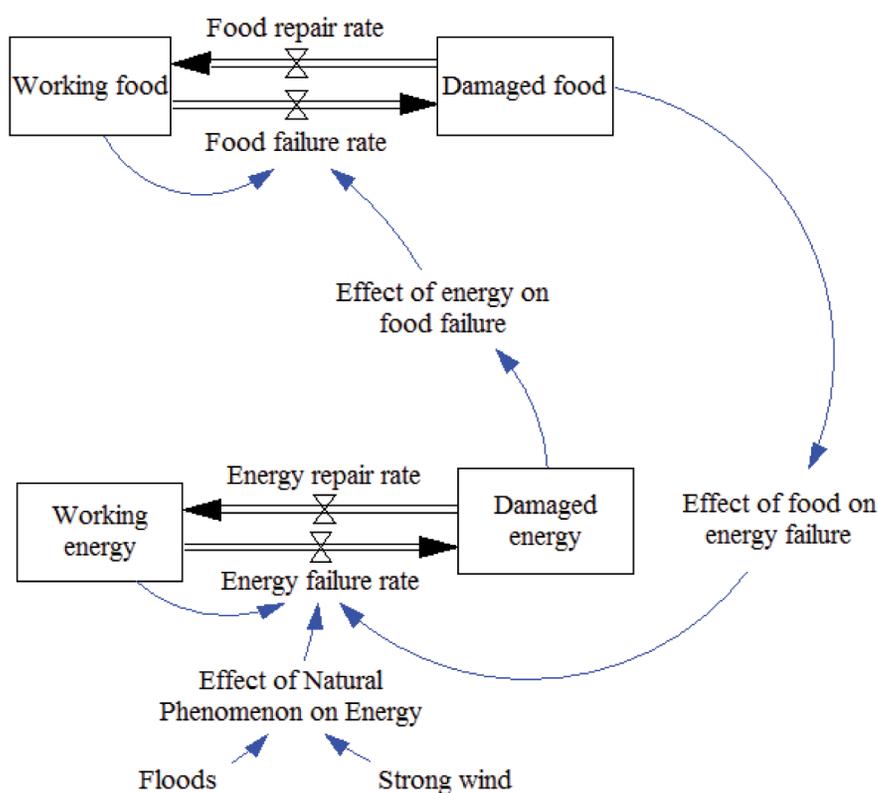


Figura 1: Estructura del modelo de simulación correspondiente a la propagación de los impactos indirectos¹

El modelo de simulación comienza en una situación de equilibrio en la que ambas ICs funcionan con normalidad. Posteriormente, hemos incluido dos variables "Strong wind" y "Floods" que simbolizan los efectos de los dos fenómenos naturales sobre el planta eléctrica. Para simular el comportamiento de estos fenómenos naturales se han utilizado sendos pulsos en las variables "Strong wind" y "Floods" ya que se trata de eventos que tienen una duración determinada y que afectan en un tiempo limitado.

¹ Para recibir más detalles del modelo de simulación envíe un e-mail con su solicitud a alauge@tecnun.es

El modelo simula el impacto recibido por ambos eventos externos de la siguiente forma. Si la planta eléctrica se ve dañada por el fenómeno natural, se activará el flujo “Energy failure rate”, causando que parte del sector energético falle incrementando el nivel “Damaged energy”. “Effect of energy on food failure” representa el efecto que tiene la falta de suministro en la infraestructura alimentaria. Sin suministro “Food failure rate” se activa incrementando el valor del nivel “Damaged food”. Como consecuencia, “Effect of food on energy failure” causará que “Damaged energy” se incremente aunque no inmediatamente sino que se necesitarán días para que la escasez de alimentos afecte a la población generando ansiedad y desórdenes públicos que, por consiguiente, también afectarán a los trabajadores de la planta eléctrica ya que dichos trabajadores pueden tener dificultades para acudir al puesto de trabajo a causa de los desórdenes públicos. Al tratarse de ICs interdependientes este efecto sobre la planta eléctrica continuará hasta que se restablezca la IC alimentaria. Por un lado (Figura 1), la planta eléctrica estará físicamente dañada por el fenómeno natural y por el efecto que la falta de alimentos tiene sobre dicha IC. Por otro lado (Figura 2), el despliegue de recursos para reparar la IC es lo que hace que el flujo “Energy repair rate”, que va desde “Damaged energy” a “Working energy”, se active. Gracias a la asignación de recursos la infraestructura eléctrica comenzará a ser reparada, lo que aumentará el nivel “Working energy” hasta que el sistema eléctrico se recupere por completo. Igualmente, se representa en el modelo una estructura similar para la infraestructura alimentaria.

En el primer escenario utilizado en la simulación el fenómeno natural daña físicamente la IC del sector energético disminuyendo su rendimiento (Figura 3). La escala del gráfico representa el porcentaje de funcionamiento de cada IC, es decir, el 100% significa que la infraestructura funciona correctamente y el 0% supone que la IC no funciona. Tanto en la hora 10 como en la hora 20 la IC del sector energético sufre una bajada en su rendimiento a causa de los daños provocados por los eventos del fenómeno natural. A pesar de que la infraestructura alimentaria no sufra daños físicos por estar en una zona protegida, su rendimiento también disminuye, como consecuencia de quedarse sin suministro eléctrico, lo que supone no poder producir ni mantener los productos refrigerados. A partir de la hora 96, debido a los problemas que la falta de abastecimiento de alimentos básicos genera, se observa un leve empeoramiento del rendimiento de la planta eléctrica. Esta reducción del rendimiento de la planta afecta también a la recuperación del sector de la alimentación ralentizándola. En esta parte de la simulación se observa el efecto de las interdependencias entre ICs. La falta de energía afecta a la IC alimentaria que, con el tiempo, tiene efecto sobre la planta eléctrica lo que a su vez ralentiza la recuperación de la IC alimentaria.

En el segundo escenario ocurren los mismos fenómenos naturales que en el primero, pero en este caso los gestores han implementado políticas de prevención para reducir la interdependencia entre ambas ICs. La aplicación de distintas políticas de gestión de crisis puede reducir el nivel de dependencia entre

las ICs tal y como se muestra en la siguiente gráfica. La Figura 4 representa la simulación “Reduced dependency” y muestra el rendimiento de las dos ICs cuando se han aplicado distintas políticas de prevención que hacen que las ICs estén mejor preparadas ante un evento y que su reparación sea más eficaz. En el modelo de simulación se han modificado las variables que representan el nivel de dependencia entre ambas ICs así como el tiempo deseado para su reparación. En este escenario ambas infraestructuras recuperan su funcionamiento habitual más rápidamente

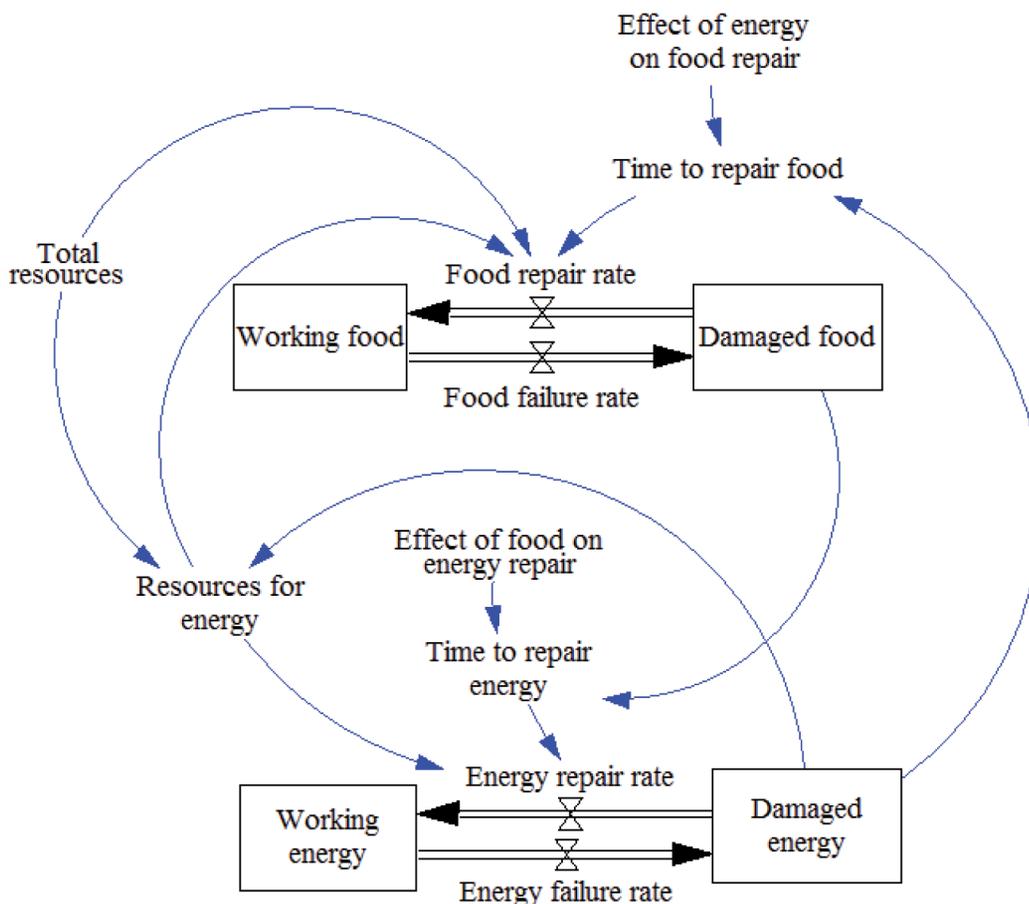


Figura 2: Estructura del modelo de simulación correspondiente a la recuperación

que en el escenario de la Figura 3. Una de las políticas de prevención que se ha implementado en este caso ha sido la instalación de generadores en la infraestructura alimentaria que reducen su dependencia con la IC del sector energético, consiguiendo que esta IC mantenga su funcionamiento durante unas horas, aunque la infraestructura energética haya fallado. Esta política se implementa en el modelo a través de la variable “Effect of energy on food failure” para que la falta de suministro no afecte inmediatamente sino que lo haga transcurridas cuatro horas. Este tiempo representa las horas de autonomía que tiene el generador. Asimismo, se han aplicado políticas

de entrenamiento que hacen que los recursos necesarios para reparar y recuperar la actividad normal de las ICs sean más eficaces. Para simular esta política se ha reducido el tiempo objetivo para reparar cada IC ya que al estar los recursos mejor preparados el tiempo de reparación necesario será menor. Gracias a la aplicación de estas políticas, se ha conseguido frenar el mecanismo de activación de la interdependencia entre ambas ICs en este segundo escenario. En el escenario “Base run” podíamos ver que a partir de la hora 96 la escasez de alimentos afectaba al rendimiento de la planta eléctrica que a su vez ralentizaba la recuperación de la infraestructura alimentaria.

Sin embargo, gracias a la aplicación de políticas de prevención y preparación, en la simulación del segundo escenario este efecto no acontece, por lo que además de reducirse el porcentaje de infraestructura que no funciona, se observa que la recuperación completa de las ICs requeriría menos tiempo. En el escenario “Reduced dependency” el tiempo necesario para recobrar la actividad habitual es de tres días, mientras que el escenario “Base run” conduciría a una completa restauración de las ICs en aproximadamente siete días.

Además de reducir notablemente el tiempo de recuperación de las ICs, para apreciar con mayor detalle la magnitud de las mejoras que la aplicación de políticas de preparación tienen sobre el impacto final se ha medido el impacto acumulado que sufre cada IC. El impacto acumulado se mide calculando el área bajo la curva del rendimiento de cada IC, es decir, la suma de los impactos en cada instante de tiempo. Se utiliza la “unidad de impacto” para comparar el impacto total de las ICs siendo una “unidad de impacto” igual al fallo del 1% de una IC durante 1 hora. Como se puede observar en la Tabla 2 el impacto total es menor en el escenario “Reduced dependency”. Si se

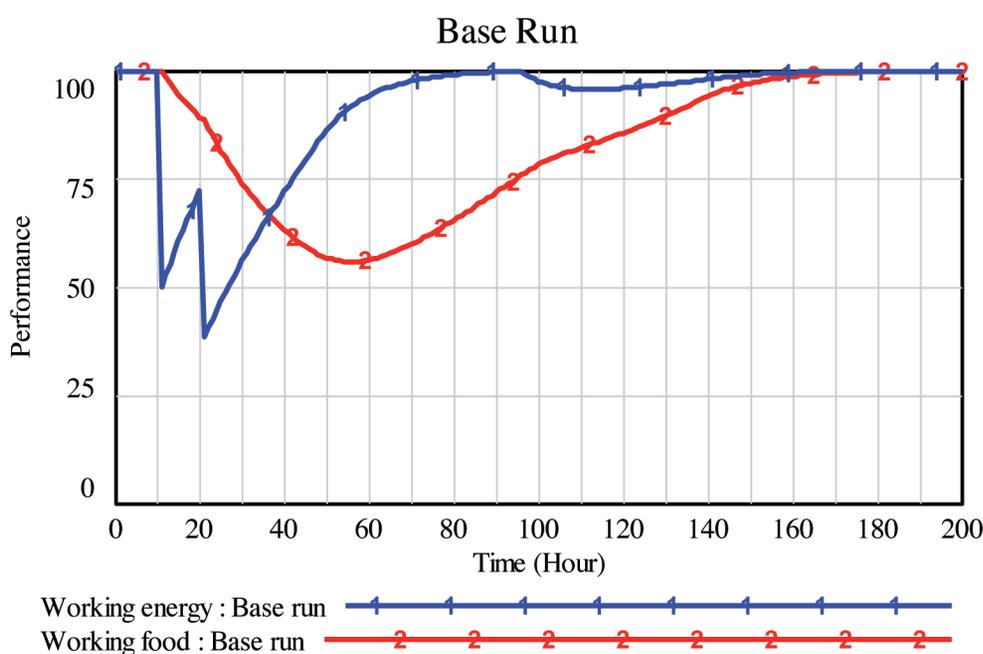


Figura 3: Rendimiento de la central eléctrica y la IC alimentaria al sufrir los efectos de un fenómeno natural

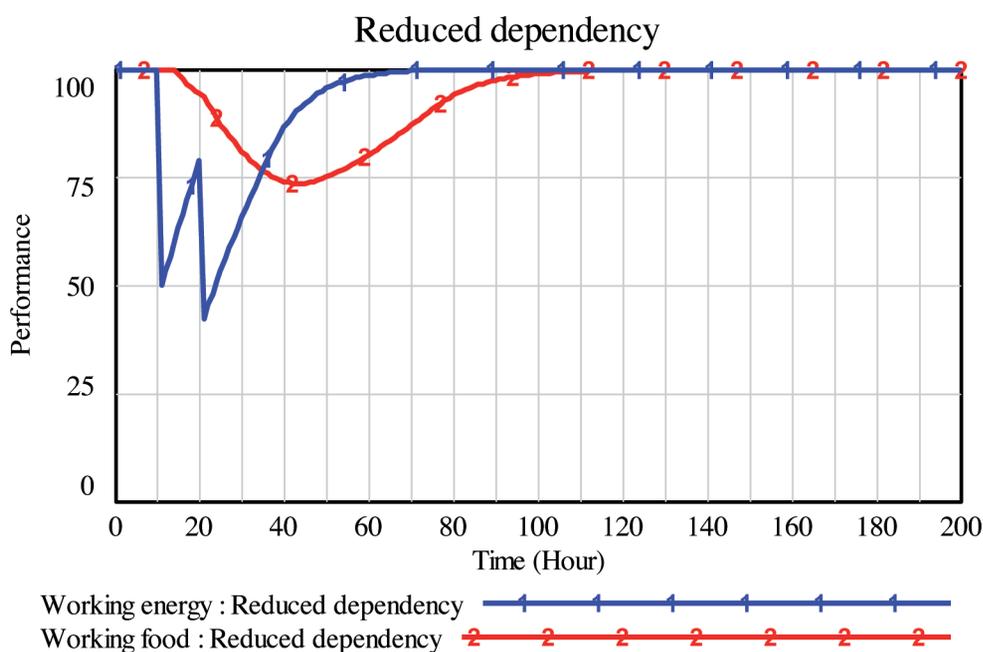


Figura 4: Rendimiento de las ICs simulando diferentes políticas de gestión

tradujera la “unidad de impacto” a términos económicos para cada IC, la reducción de las interdependencias entre el sector energético y el de alimentación podría conseguir reducir el impacto en un 36% en el caso del sector energético y en un 65% sobre el de alimentación.

	Energy	Food
Base run	1782	3407
Reduced dependency	1148	1194

Tabla 2: “Unidades de impacto” de cada IC en base al escenario

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las ICs pueden verse gravemente afectadas por distintas crisis y, debido a las dependencias e interdependencias entre ellas, las consecuencias se extienden y prolongan en el tiempo [41]. Las dependencias e interdependencias entre las ICs no sólo propagan los fallos sino que además dificultan y ralentizan la reparación y puesta en marcha de las ICs dependientes [42].

Un correcto análisis de todas las dependencias e interdependencias existentes entre ICs resulta de gran importancia para mejorar la gestión de crisis. Por lo tanto, es necesario trabajar en su identificación y comprensión para poder analizar los efectos en cascada que se producen. El modelo de simulación desarrollado permite representar las dependencias e interdependencias y analizar la evolución en el tiempo de los impactos causados por estas interdependencias en el tiempo. Las simulaciones muestran cómo el impacto directo de un fenómeno natural puede dañar una IC y extenderse a otra, reduciendo su rendimiento aunque no se vea directamente dañada por el fenómeno en sí.

El modelo de simulación desarrollado permite una mejor comprensión de las dependencias e interdependencias entre ICs ya que pone de manifiesto la propagación de los impactos indirectos de una IC a otra así como su evolución en el tiempo al aplicar distintas políticas. No obstante, el modelo de simulación ha sido desarrollado con un propósito pedagógico ya que para su calibración es necesaria la colaboración de los gestores, quienes pueden proporcionar la estimación de parámetros necesaria a incluir en cada escenario que se desee simular. El objetivo es que pueda ser utilizado por los gestores como herramienta de formación. El modelo puede ser calibrado para simular diversos escenarios y sus efectos asociados cuando una o varias ICs fallan afectando negativamente a otras y a la sociedad en su conjunto. El modelo de simulación presentado se centra sólo en dos ICs. Sin embargo, nuestro objetivo es ampliarlo a fin de representar las dependencias e interdependencias existentes entre todas las ICs incluidas en el PEPIC [7]. Además, se incluirán diversas políticas de prevención, preparación y respuesta que tengan relevancia en la gestión de crisis. La simulación de distintas políticas de gestión de crisis puede ayudar a los gestores a entender la compleja evolución de estos sistemas en el tiempo con el fin de mejorar su preparación ante futuros eventos. El modelo de simulación una vez calibrado permitirá a los gestores simular diferentes

escenarios con perspectivas a corto y largo plazo y el análisis de los efectos de la implementación de diversas políticas de gestión de crisis. A la luz de los resultados expuestos mediante esta investigación, este tipo de modelos de simulación pueden ser una herramienta valiosa de capacitación para mejorar la gestión de futuros eventos.

Este estudio se enmarca dentro de una investigación cuyo objetivo final es el desarrollo de un marco de referencia dinámico para la evaluación de impactos tanto directos como indirectos. Por un lado, el marco de referencia tendrá una perspectiva global e incluirá todos los sectores afectados por los fenómenos naturales, tales como la economía, el medio ambiente, la sociedad y, por supuesto, las ICs. Por otro lado, el marco incluirá una perspectiva dinámica a través del desarrollo de modelos de simulación, tales como el presentado en este documento, ya que pueden ser utilizados por los gestores como herramienta de entrenamiento para representar distintos escenarios y ayudar en la toma de decisiones. Mediante el análisis de la intensificación del impacto de un fenómeno natural a través del fallo de las ICs, los gestores pueden aprender cómo la toma de decisiones y la aplicación de las diferentes políticas afectan el desarrollo y resolución de una crisis.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido parcialmente financiada por el Séptimo Programa Marco de la Comunidad Europea para acciones de investigación, desarrollo tecnológico y demostración en virtud del acuerdo de subvención número 312497.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dudenhoeffer DD, Permann MR, Manic M. *CIMS: A Framework for Infrastructure Interdependency Modeling and Analysis*. IEEE, 2006. 478-485p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/WSC.2006.323119>.
- [2] Min HSJ, et al. "Toward Modeling and Simulation of Critical National Infrastructure Interdependencies". *IIE Transactions*. 2007. Vol.39-1. p.57-71. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07408170600940005>.
- [3] Sarriegi JM, et al. "Towards a Research Framework for Critical Infrastructure Interdependencies". *International Journal of Emergency Management*. 2008. Vol.5-3. p.235-249. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJEM.2008.025094>.
- [4] Oliva G, Panzieri S, Setola R. "Agent-Based Input-Output Interdependency Model". *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2010. Vol.3-2. p.76-82. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcip.2010.05.001>.
- [5] The Council of the European Union. *COUNCIL DIRECTIVE 2008/114/EC of 8 December 2008 on the Identification and Designation of European Critical Infrastructures and the Assessment of the Need to Improve their Protection*. European Union: 2008.
- [6] Boin A, McConnell A. "Preparing for Critical Infrastructure Breakdowns: The Limits of Crisis Management and the Need for Resilience". *JOURNAL OF CONTINGENCIES AND CRISIS MANAGEMENT*. 2007. Vol.15-1.
- [7] Commission of the European Communities. *Green Paper on a European Programme for Critical Infrastructure Protection*. Brussels: 2005.

- [8] Chang SE, et al. "Infrastructure Failure Interdependencies in Extreme Events: Power Outage Consequences in the 1998 Ice Storm". *Natural Hazards*. 2007. Vol.41-2. p.337-358. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-006-9039-4>.
- [9] Stapelberg RF. "Infrastructure Systems Interdependencies and Risk Informed Decision Making (RIDM): Impact Scenario Analysis of Infrastructure Risks Induced by Natural, Technological and Intentional Hazards". *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*. 2008. Vol.6-5. p.21-27.
- [10] Zimmerman R, Restrepo CE. "The Next Step: Quantifying Infrastructure Interdependencies to Improve Security". *International Journal of Critical Infrastructures*. 2006. Vol.2-2. p.215-230.
- [11] Rinaldi SM. *Modeling and Simulating Critical Infrastructures and their Interdependencies*. IEEE, 2004. 8p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/HICSS.2004.1265180>.
- [12] Laugé A, et al. "Análisis Y Clasificación De Los Impactos En Situaciones De Crisis". *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. 2012. Vol.12-2. p.179-186.
- [13] ECLAC. *Handbook for Estimating the Socio-Economic and Environmental Effects of Disasters*. United Nations, Economic Commission for Latin America and the Caribbean and World Bank (editor). Mexico: 2003.
- [14] Mckenzie E, Prasad B, Kaloumaira A. *Guidelines for Estimating the Economic Impact of Natural Disasters on Development in the Pacific*. Australia: Australian Agency for International Development, 2005.
- [15] Eusgeld I, Nan C, Dietz S. "System-of-Systems Approach for Interdependent Critical Infrastructures". *Reliability Engineering & System Safety*. 2011. Vol.96-6. p.679-686. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2010.12.010>.
- [16] Sarriegi JM, et al. "Adaptation of Modelling Paradigms to the CIs Interdependencies Problem". *Critical Information Infrastructure Security*. 2009. Vol.5508/2009 p.295. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-03552-4_27.
- [17] Oliva G, Panzieri S, Setola R. *Online Distributed Interdependency Estimation for Critical Infrastructures*. IEEE, 2011. 7224-7229p. DOI:10.1109/CDC.2011.6160930.
- [18] Dunn M, Wigert I. *International CIIP Handbook: An Inventory and Analysis of Protection Policies in Fourteen Countries*. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2004. ISBN: 3905641925/9783905641929.
- [19] Bologna S. *An Overview of R&D Activities in Europe on Critical Information Infrastructure Protection (CIIP)*. Lopez, J. (editor). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, LNCS, 2006. 91-102p. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/11962977_8.
- [20] Rinaldi SM, Peerenboom JP, Kelly TK. "Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies". *Control Systems, IEEE*. 2001. Vol.21-6. p.11-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/37.969131>.
- [21] Eusgeld I, Henzi D, Kröger W. "Comparative Evaluation of Modeling and Simulation Techniques for Interdependent Critical Infrastructures". *Scientific Report, Laboratory for Safety Analysis, ETH Zurich*. 2008.
- [22] FEMA. *HAZUS-MH MR5*. Washington D. C.: 2002.
- [23] Logar I, van den Bergh JCJM. *Methods for Assessment of the Costs of Droughts*. Institute of Environmental Science and Technology, Universitat Autònoma de Barcelona (editor). CONHAZ ProjectSpain: 2011.
- [24] Lequeux Q, Ciavola P. *Methods for Estimating the Costs of Coastal Hazards*. Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara (editor). CONHAZ ProjectItaly: 2011.
- [25] Pfurtscheller P., Lochner B., Thieken A. H. "Costs of Alpine Hazards". Institute of Geography, University of Innsbruck ed., CONHAZ Report ed. Austria: , 2011.
- [26] Setola R, De Porcellinis S, Sforza M. "Critical Infrastructure Dependency Assessment using the Input-output Inoperability Model". *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 2009. Vol.2-4. p.170-178. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijcip.2009.09.002>.
- [27] Schmitz W. *Analysis and Assessment for Critical Infrastructure Protection (ACIP)*. Ottobrunn, Germany: ACIP consortium, 2003.
- [28] Beyer U, Flentge F. "Towards a Holistic Metamodel for Systems of Critical Infrastructures". *European CIIP Newsletter*. 2006. Vol.2-3. p.6-8.
- [29] Bloomfield R, Chozos N, Nobles P. *Infrastructure Interdependency Analysis: Introductory Research Review*. Adelard LLP, 2009.
- [30] Casalicchio E, Galli E, Tucci S. *Federated Agent-Based Modeling and Simulation Approach to Study Interdependencies in IT Critical Infrastructures*. IEEE, 2007. 182-189p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DS-RT.2007.11>.
- [31] Leontief WW. "Input-Output Economics". *Scientific American*. 1951. Vol.185 p.15-21.
- [32] Haimes YY, et al. "Inoperability Input-Output Model for Interdependent Infrastructure Sectors. I: Theory and Methodology". *Journal of Infrastructure Systems*. 2005. Vol.11-2. p.67-79. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:2\(67\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:2(67)).
- [33] Setola R. "How to Measure the Degree of Interdependencies among Critical Infrastructures". *International Journal of System of Systems Engineering*. 2010. Vol.2-1. p.38-59. DOI: <http://dx.doi.org/10.1504/IJSSE.2010.035380>.
- [34] Oliva G, Panzieri S, Setola R. "Distributed Synchronization Under Uncertainty: A Fuzzy Approach". *Fuzzy Sets and Systems*. 2012. DOI:10.1016/j.fss.2012.02.003.
- [35] Forrester J. *Industrial Dynamics*. Cambridge: MIT Press, 1961. 479p. ISBN: 978-0915299881.
- [36] Sterman JD. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000. 982p. ISBN: 0072311355 (alk. paper).
- [37] Svein FO, Torres JM, Sarriegi JM. *Modeling Critical Infrastructure Interdependencies: Choosing a Modeling Technique*. Prague, Prague: 2008. ISBN: 978-90-9023299-7.
- [38] Zimmerman R. *Decision-Making and the Vulnerability of Interdependent Critical Infrastructure*. IEEE, 2004. 4059-4063p. DOI:10.1109/ICSMC.2004.1401166.
- [39] Bush B, et al. *Critical Infrastructure Protection Decision Support System (CIP/DSS) Project Overview*. 2005.
- [40] LeClaire RJ, Hirsch GB, Bandlow A. *Learning Environment Simulator: A Tool for Local Decision Makers and First Responders*. 2009.
- [41] Government of Canada. *National Strategy for Critical Infrastructure*. Canada: Her Majesty the Queen in Right of Canada, 2009.
- [42] National Research Council. *Improving Disaster Management: The Role of IT in Mitigation, Preparedness, Response, and Recovery*. Rao, Ramesh R., Eisenberg, Jon, Schmitt, Ted (editores). Washington DC: The National Academies Press, 2007.