

**Publicación especial 1190GB-4 de
NIST**

**Informe de Referencia 4:
Determinar el desempeño previsto**

Esta publicación está disponible de forma gratuita
en el siguiente sitio web:
<http://doi.org/10.6028/NIST.SP.1190GB-4>

Publicación especial 1190GB-4 de NIST

Informe de Referencia 4 Determinar el desempeño previsto

Esta publicación está disponible de forma gratuita en el siguiente sitio web:
<http://doi.org/10.6028/NIST.SP.1190GB-4>

Septiembre de 2016



Departamento de Comercio de los Estados Unidos
Penny Pritzker, secretaria

Instituto Nacional de Estándares y Tecnología
Willie May, subsecretario de comercio de Estándares y Tecnología y director

Es posible que se nombren ciertas entidades comerciales, equipos o materiales en el presente documento para describir un procedimiento o un concepto experimental de manera adecuada. El propósito de tal identificación no es sugerir la recomendación o el respaldo por parte del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, ni tampoco indicar que las entidades, los materiales o los equipos son necesariamente la mejor opción disponible para lograr el objetivo.

Publicación especial 1190GB-4 a nivel nacional del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología
Publicación especial del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología 1190GB-4, 12 páginas
(septiembre de 2016)
CODEN: NSPUE2

Esta publicación está disponible de forma gratuita en el siguiente sitio
web: <http://doi.org/10.6028/NIST.SP.1190GB-4>

Informe de Referencia 4: Determinar el desempeño previsto

Sección(es) correspondiente(s)
de la Guía:

Volumen 1, Sección 4.1.4, Determinar el desempeño previsto, p. 46

Los Informes de Referencia complementan la Guía de Planificación de Resiliencia Comunitaria para Edificios y Sistemas de Infraestructura (NIST SP1190)

I. Objetivo y alcance



Este Informe de Referencia respalda el Paso 3 (Determinar metas y objetivos). Ofrece una orientación para determinar el desempeño previsto de los grupos de edificios y los sistemas de infraestructura al verse afectados por eventos peligrosos. Esta información se necesita para completar las tablas de objetivos de desempeño, determinar el desempeño actual del sistema y constatar las brechas de resiliencia.

Está diseñada para que la utilicen los gerentes, operadores o consultores de instalaciones que cuentan con conocimientos de ingeniería pero que posiblemente no estén familiarizados con la forma de estimar el desempeño previsto de las instalaciones tras un evento perjudicial. La metodología descrita aquí se aplica a los grupos de edificios y todos los sistemas de infraestructura de apoyo. El Informe de Referencia 4A, *Ejemplo para determinar el desempeño previsto*, presenta un ejemplo de cómo evaluar un sistema de agua pequeño y un sistema de aguas residuales cuando se ven afectados por un terremoto de subducción.

2. Introducción

Un paso fundamental para identificar brechas y necesidades en la planificación de resiliencia comunitaria consiste en determinar el desempeño previsto del entorno construido, lo que incluye los niveles de daño posteriores al evento y el tiempo correspondiente para recuperar la funcionalidad. Incluye evaluaciones del desempeño de los sistemas de infraestructura y grupos de edificios existentes. El tiempo y los costos de recuperar la funcionalidad del sistema de infraestructura se basan en los componentes críticos del sistema.

En el ejemplo de Riverbend (Capítulo 9 de la Guía), el desempeño previsto de la respuesta de los sistemas de agua ante una inundación grande se muestra como una “X” en los cuadros azules de la Tabla 9-28 (que se repite aquí en la Tabla 1). Los objetivos de desempeño deseados representan los planes de recuperación de la comunidad que minimizarían los efectos a largo plazo y se indican como un 30%, 60% y 90% de funcionalidad del sistema; de esta manera, se reconoce la necesidad de una recuperación en etapas en la escala comunitaria. El desempeño previsto representa el tiempo en el que se espera que se recupere un 90% de los principales subsistemas de infraestructura del agua con respecto a la capacidad anterior al evento teniendo en cuenta su condición actual, configuración y planes de recuperación.

Tabla 1: Objetivos de desempeño de la infraestructura ante inundaciones grandes en Riverbend, Estados Unidos (Tabla 9-28 de la Guía)

Incidente ¹		Niveles de restauración ^{2,3}	
Tipo de peligro	Inundación	30%	Funcionamiento restaurado
Nivel de peligro	Extremo	60%	Funcionamiento restaurado
Zona afectada	Regional	90%	Funcionamiento restaurado
Nivel de perturbación	Grave	X	Desempeño previsto

Infraestructura hídrica	Apoyo necesario ⁴	Desempeño del peligro de diseño								
		Etapa 1 Corto plazo			Etapa 2 Medio plazo			Etapa 3 Largo plazo		
		Días			Semanas			Meses		
		0	1	1-3	1-4	4-8	8-12	4	4-24	24+
Fuente										
Agua cruda o de manantial y embalses terminales	R, E, ME	30%		60%	90%			X		
Distribución de agua cruda (estaciones de bombeo y tuberías hacia la planta de tratamiento de aguas)	R, E, ME				60%	90%			X	
Agua potable en el suministro (planta de tratamiento de aguas, pozos, embalse)	R, E, ME			30%	60%	90%			X	
Agua para extinción de incendios en puntos clave de suministro (para aumentar la redundancia)	R, E, ME			90%	X					
Transmisión (incluidas las estaciones de repetición)										
Instalaciones principales de transmisión (tuberías, estaciones de bombeo y tanques)	R, E, ME	30%				60%		90%	X	
Sistemas de control										
SCADA u otros sistemas de control	R, E, ME				30%	60%	90%	X		
Distribución										
Instalaciones críticas										
Usuarios mayoristas (otras comunidades, distritos hidráulicos rurales)	R, E, ME					60%		90%	X	
Hospitales, EOC, estaciones de policía, estaciones de bomberos	R, E, ME				60%	90%		X		
Viviendas de emergencia										
Refugios de emergencia	R, E, ME				60%	90%		X		
Viviendas/vecindarios										
Agua potable disponible en los centros de distribución comunitarios	R, E, ME			30%	60%	90%		X		
Agua para extinción de incendios en las bocas de incendio	R, E, ME				60%	90%			X	
Infraestructura de recuperación comunitaria										
El resto de los grupos	R, E, ME						60%	90%		X

Notas al pie:

- Indicación del tipo de peligro que se considera.
Indicación del nivel del peligro: de rutina, de diseño, extremo.
Indicación del tamaño previsto de la zona afectada: localidad, comunidad, región.
Indicación del nivel de gravedad previsto de la perturbación: leve, moderado, grave.
- 30% 60% 90% Plazos de recuperación deseados para el porcentaje de elementos dentro del grupo.
- X Desempeño previsto para la restauración del 90% del grupo de edificios y sistemas de infraestructura existentes.
Los plazos de recuperación del grupo se mostrarán en la Matriz de Resumen.
- Indicación de los niveles de apoyo previstos por el plan.
R = Regional; E = Estatal; ME = Multiestatal; C = Civil (empresas/comunidad).

La metodología para estimar el desempeño previsto de un sistema de infraestructura, como sistemas de energía, agua o transporte, cuando se ve afectado por un evento peligroso natural incluye lo siguiente:

- **Sección 2: Determinar el desempeño previsto de los componentes del sistema de infraestructura.** Evaluar el desempeño del sistema al tener en cuenta el desempeño previsto de los componentes individuales. El desempeño previsto de cada componente crítico se puede determinar mediante las curvas de fragilidad. Estas son relaciones de daño expresadas en términos de la intensidad o magnitud del peligro y la correspondiente probabilidad de falla del componente. Se proporcionan fuentes de curvas de fragilidad de los componentes.
- **Sección 3: Determinar el desempeño previsto del sistema de infraestructura.** El desempeño del sistema de infraestructura se estima mediante el desempeño previsto de los componentes del sistema. El desempeño también se puede ver afectado por características y factores externos (p. ej. las características del suelo y el movimiento sísmico esperado en el caso de terremotos) que se podrían considerar en conjunto con el desempeño de los componentes individuales. Otros factores externos también pueden afectar el desempeño del sistema, como el desempeño de los servicios públicos circundantes o las instalaciones ubicadas en el mismo sitio (p. ej. tuberías ubicadas en puentes).
- **Sección 4: Determinar el desempeño previsto de los grupos de edificios.** Un grupo de edificios es un conjunto de edificios que tienen una función en común, como viviendas, cuidado de salud o comercios minoristas. Las curvas de fragilidad también se utilizan para estimar el desempeño de los tipos de edificios en un grupo de edificios. El desempeño previsto de los grupos de edificios se determina prácticamente de la misma manera que en los sistemas de infraestructura: el desempeño previsto de los tipos de edificios individuales se suma para determinar el del grupo.
- **Sección 5: Uso de Hazus.** Este Informe de Referencia finaliza con un breve análisis de Hazus, una herramienta nacional de estimación de daños y pérdidas distribuida por la FEMA. Hazus brinda una amplia gama de curvas de fragilidad para el desempeño previsto de muchos tipos de edificios y componentes de sistemas de infraestructura ante peligros como terremotos, inundaciones y huracanes.

En el Informe de Referencia 4A se incluye un ejemplo de los enfoques descritos para el análisis de un sistema de infraestructura hidráulico y un peligro de terremoto.

3. Determinar el desempeño previsto de los componentes del sistema de infraestructura.

Esta sección ofrece una orientación para determinar el desempeño previsto de los componentes del sistema de infraestructura ante peligros seleccionados. Se presume que cada comunidad identificará los distintos peligros que podrían impactarlas, con tres niveles de peligro para cada uno, como se describe en la Sección 4.1.3 de la Guía, *Definir los peligros y niveles de la comunidad*.

Dividir el sistema de infraestructura en varios componentes, como se describe en la Sección 3.2 de la Guía, *Caracterizar el entorno construido*. Las comunidades pueden evaluar varios sistemas de infraestructura, incluidos el transporte, la energía, las comunicaciones y los sistemas de agua y de aguas residuales. Por ejemplo, un sistema de agua puede estar compuesto por un dique y un embalse, tuberías de transmisión, una planta de tratamiento de aguas, estaciones de bombeo, tanques de almacenamiento y tuberías de distribución. Los sistemas pueden contener muchos componentes iguales (p. ej. múltiples tanques de almacenamiento o segmentos de las tuberías de distribución). Se deben identificar los componentes que dependan de otros sistemas de infraestructura debido a que la dependencia puede impulsar una secuencia óptima de actividades de respuesta y recuperación. De manera similar, también se deben identificar los componentes de los que dependen otros sistemas de infraestructura.

Identificar los componentes críticos que se requieren para asegurar la funcionalidad del sistema. Componentes necesarios para satisfacer las demandas posteriores a un evento que se deben identificar. Las demandas posteriores a un evento difieren de las demandas máximas durante el funcionamiento normal, debido a la reducción de la demanda o distintos tipos de demanda durante la recuperación (sin embargo, es probable que estas dos situaciones se superpongan). Por ejemplo, es posible que las instalaciones de los sistemas de agua no necesiten satisfacer los flujos de demanda máxima durante el verano. En cambio, puede que sea suficiente satisfacer la demanda habitual o de invierno. Teniendo esto en cuenta, un proveedor de servicios de agua puede tener un objetivo de desempeño que consista en satisfacer la demanda habitual de invierno dentro de un plazo

establecido, lo que representa la mitad de la demanda máxima diaria. Los componentes que tienen un papel secundario posiblemente no sean fundamentales para la recuperación del funcionamiento del sistema.

El desempeño de un componente se define a partir del nivel previsto de funcionalidad tras un evento peligroso, su capacidad relacionada, y el tiempo y el costo para recuperar la funcionalidad teniendo en cuenta el tipo y el nivel del daño. El tiempo de recuperación del componente se utiliza para determinar el tiempo de recuperación del sistema en general. Los costos de recuperación que se evitan o reducen mediante la planificación o mitigación previa al evento se pueden considerar beneficios en un análisis costo-beneficio.

Estimar el desempeño de los componentes con las curvas de fragilidad. Una curva de fragilidad estima el desempeño previsto de un componente de un sistema ante un nivel de peligro en términos de la probabilidad de que se produzca algún nivel bien definido de daño, que a menudo se expresa como una *probabilidad de falla*. Por ejemplo, en un edificio se pueden evaluar distintos tipos de daño en función del peligro, como la pérdida del techo o el revestimiento externo en los eventos de vientos, daños en los cimientos en las inundaciones o daño estructural en terremotos. Los niveles de daño pueden variar desde *leve* (es decir, un nivel de daño que se puede reparar rápidamente con herramientas comunes y piezas de repuesto) hasta *completo* (es decir, un nivel de daño que no se puede reparar, lo que requiere que se reemplace el componente por uno nuevo)¹. No obstante, se deben realizar evaluaciones específicas del sitio en el caso de los componentes que pueden representar un riesgo para la comunidad si sufren daños.

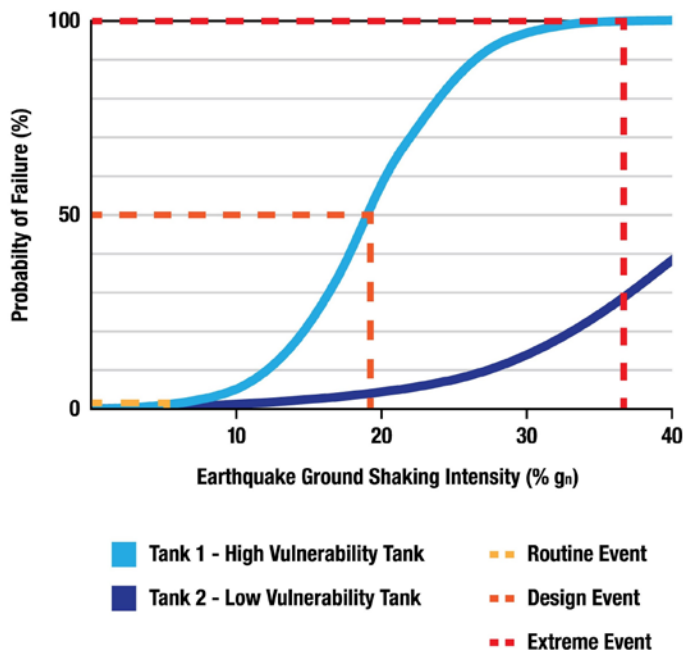


Figura 1. Ejemplo de relaciones de fragilidad de dos tanques de almacenamiento de agua, con probabilidad de falla ante la intensidad de movimiento de la tierra de un terremoto (aceleración máxima de la tierra expresada como un porcentaje de la gravedad)

Las curvas de fragilidad ofrecen una relación entre la magnitud del peligro y la probabilidad de daño de un componente. También se las denomina *relaciones de fragilidad* o *fragilidades*. La Figura 1 muestra un ejemplo de una relación de fragilidad para la probabilidad de falla de dos tipos de tanques de almacenamiento y tres niveles de intensidad de movimiento de la tierra

¹ Consulte los Estados de daño de Hazus, mencionados en la Sección 6 de este Informe de Referencia (frecuentes en todas las descripciones de daño en este párrafo).

en terremotos. El modo de falla puede ser un vuelco, con problemas cerca de los cimientos, u otros modos que afecten la funcionalidad del tanque de agua (consulte el Volumen I, Tabla 4-5 de la Guía para obtener una descripción de ejemplo de los niveles de peligro de sismo). Al tanque n.º 1 se le designó una vulnerabilidad alta para este entorno sísmico y no se diseñó para soportar el evento de diseño. Este tanque tiene una probabilidad baja de que falle durante un evento de rutina, una probabilidad del 50% de que falle ante un evento de diseño y una probabilidad del 100% de que falle ante un evento extremo. Al tanque n.º 2 se le designó una vulnerabilidad baja debido a que se diseñó para el evento del nivel de diseño. Las probabilidades de falla de este tanque son las siguientes: casi cero ante el evento de rutina, alrededor del 5% ante el evento de diseño y 20% ante el evento extremo. Cabe mencionar el aumento de la probabilidad de falla a medida que aumenta la intensidad del peligro de rutina a diseño y hasta niveles extremos. El formato de la fragilidad puede diferir según la naturaleza del componente. Si el desempeño del componente claramente está relacionado con un único elemento que tiene un mecanismo de falla bien conocido, la curva de fragilidad será pronunciada o casi vertical, como se muestra en el tanque n.º 1. Si el desempeño del componente se basa en varios elementos, de modo que hay menor probabilidad de que suceda una falla, la curva de fragilidad tiende a ser más horizontal, como se muestra en el tanque n.º 2.

Si existen varios modos de falla para un componente, se pueden desarrollar curvas de fragilidad separadas para cada modo a fin de determinar su influencia relativa en el desempeño del componente. Por ejemplo, en las pasarelas de los puentes pueden ocurrir fallas en las columnas de soporte o en el tablero del puente. También puede suceder que el equipo eléctrico ubicado en el primer piso de un edificio sea más vulnerable a un peligro de inundación que la integridad de los cimientos del edificio; ambos tipos de daño afectarían la función prevista del edificio. En algunos casos, la probabilidad de falla del componente se puede calcular de manera aproximada como la probabilidad del modo de falla más probable. En otros casos, es posible que sea necesario combinar múltiples modos de falla. Si los modos de falla son independientes y sus probabilidades son bajas, una estimación simple consiste en sumar todas las probabilidades de falla.

Si un sistema está compuesto por muchos componentes del mismo tipo, la probabilidad de falla se puede considerar como la cantidad de componentes que se espera que falle cada 100 ante una intensidad de peligro específica. Por ejemplo, en la Figura 1, se esperaría que alrededor de 2 de cada 100 tanques de almacenamiento fallen en un evento de rutina; alrededor de 45 de cada 100 fallarían en un evento de diseño; y prácticamente todos fallarían en un evento extremo.

Trazar mapas espaciales de la intensidad del peligro de los componentes del sistema. Un Sistema de Información Geográfica (SIG) puede ilustrar la variación espacial de los peligros, como las inundaciones o sismos, para los componentes críticos en los sistemas de infraestructura distribuidos. Un mapa de SIG para cada uno de los tres niveles de peligro (de rutina, diseño y extremo) puede ayudar a visualizar cómo varían los niveles y la magnitud del daño del sistema ante los tres niveles de peligro.

Fuentes de las curvas de fragilidad publicadas. Las curvas de fragilidad se pueden desarrollar con varios métodos, o una combinación de estos, como se muestra en la Tabla 2. Porter (2016) ofrece un resumen general del desarrollo y uso de la curva de fragilidad.²

Actualmente se han desarrollado muchas curvas de fragilidad en función de tales métodos y están disponibles en las siguientes fuentes. Hazus proporciona uno de los grupos más exhaustivos de curvas de fragilidad disponibles al público (ver Sección 5). El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos desarrolló relaciones de fragilidad para caracterizar la viabilidad del sistema de las estructuras de recursos hídricos (<http://www.usace.army.mil/Media/News-Archive/Story-Article-View/Article/477787/partnering-equals-teamwork/>).

Los investigadores y las instituciones académicas también desarrollaron curvas de fragilidad para los edificios y sistemas de infraestructura. Los siguientes centros de terremotos desarrollaron curvas de fragilidad sísmica: Búfalo, NY (NCEER/MCEER) (<http://www.buffalo.edu/mceer.html>); Champaign, IL (MAE Center) (<http://mae.cce.illinois.edu/>); Memphis, TN (CERI) (<http://www.memphis.edu/ceri/>); y Berkley, CA (PEER) (<http://peer.berkeley.edu/>). El Centro de Planificación de Resiliencia Comunitaria Basada en el Riesgo (Center for Risk-Based Community Resilience Planning) (<http://resilience.colostate.edu/>) está desarrollando un modelo a escala comunitaria del entorno construido y las funciones sociales y económicas relacionadas, lo que incluye una base de datos de curvas de fragilidad. Esta base de datos estará disponible en 2017.

² Porter, K., 2016. *A Beginner's Guide to Fragility, Vulnerability, and Risk*. Universidad de Colorado en Boulder, 92 pp., <http://spot.colorado.edu/~porterka/Porter-beginners-guide.pdf>

Tabla 2: Ejemplos de métodos para desarrollar curvas de fragilidad

Método	Descripción/Ejemplo
Opinión de expertos	Tipo de instalación. Un ingeniero que conozca el desempeño de distintas categorías de estructura estima el desempeño a partir de su experiencia y juicio. Por ejemplo, las estructuras de acero indeformables tienen un buen desempeño en los terremotos, mientras que las paredes de mampostería no reforzadas son mucho más propensas a colapsarse.
	Fecha de construcción. Los códigos de construcción se actualizan con regularidad, lo que reduce la vulnerabilidad ante peligros. Un ingeniero que esté al tanto de las modificaciones de los códigos comprenderá las consecuencias que implican para el desempeño de los edificios y sistemas de infraestructura.
	Subcomponentes vulnerables. Es posible que la instalación tenga elementos particularmente vulnerables y que sean críticos para asegurar la funcionalidad. Por ejemplo, algunos tipos de interruptores utilizados en las subestaciones de alta tensión son vulnerables a los movimientos de la tierra ocasionados por terremotos, mientras que otros componentes pueden tener un mejor desempeño ante el mismo nivel de intensidad del peligro.
Datos empíricos de daños	Se pueden utilizar los datos de daños recopilados de distintos eventos peligrosos en un análisis de regresión para desarrollar una curva de fragilidad. Los datos de daños tienen que incluir una descripción minuciosa del componente, la intensidad del peligro y el desempeño del componente en particular que se está evaluando. Las curvas de fragilidad de las tuberías desarrolladas por American Lifelines Alliance (Alianza Estadounidense de Líneas Vitales) utilizaron esta técnica. ³
Análisis	Se utiliza un análisis estructural para determinar el desempeño de los elementos que posiblemente son vulnerables ante un rango de intensidades de peligros. El análisis debería considerar las incertidumbres de las cargas de la estructura y la capacidad de esta para resistir dichas cargas.
Pruebas	Las pruebas de cargas demuestran el desempeño (tensión, desplazamiento, etc.) a medida que aumenta la intensidad del peligro. De manera similar, las tablas de terremotos se utilizan para calificar los equipos conforme a los movimientos de la tierra a partir de terremotos seleccionados. Por lo general, se requiere realizar pruebas repetidas para obtener la variabilidad o la incertidumbre de la respuesta. Además, se debería prestar atención a la fidelidad de las condiciones de prueba al representar las condiciones actuales a las que se verá expuesto el componente.

4. Determinar el desempeño previsto del sistema de infraestructura

La probabilidad estimada de falla y el estado de daño y el nivel de funcionalidad relacionados de los componentes del sistema ante un evento peligroso informan el desempeño previsto posterior al evento del sistema de infraestructura en general. El desempeño general del sistema depende del desempeño de sus componentes, la conexión de los componentes dentro del sistema y las dependencias con otros sistemas de apoyo. El desempeño previsto del sistema se puede comparar con los objetivos deseados de desempeño, como se muestra en la Tabla 1, para identificar brechas en el desempeño.

Para determinar la funcionalidad posterior al evento de un componente del sistema en función de su curva de fragilidad, se debe considerar el tipo previsto de daño o modo de falla y cómo podría afectar su desempeño; también se debe tener en cuenta si existen niveles de desempeño o si se trata simplemente de una condición binaria de “funcional” o “no funcional”. Es posible que se presuma que muchos componentes del sistema sean no funcionales a fines de la planificación, si la probabilidad de falla supera el 50%. Por ejemplo, las estaciones de bombeo por lo general funcionan o directamente no funcionan tras un terremoto. Una planta de tratamiento se puede considerar parcialmente funcional si puede brindar algún grado de tratamiento primario.

³ American Lifelines Alliance, Seismic Fragility Formulations, Part 1 Guidelines, abril de 2001, http://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Part_1_Guideline.pdf; American Lifelines Alliance, Seismic Fragility Formulations, Part 2 Appendices, abril de 2001, http://www.americanlifelinesalliance.com/pdf/Part_2_Appendices.pdf

Existen tres enfoques generales para evaluar el desempeño del sistema posterior al evento: 1) método de eventos similares, 2) método de evaluación en talleres y 3) método de modelación del sistema. El examen del desempeño del sistema posterior al evento luego se utiliza para estimar el costo y el tiempo de recuperación para lograr los objetivos de desempeño deseados de la comunidad y sus edificios y sistemas de infraestructura.

4.1. Método de eventos similares

El desempeño previsto del sistema de infraestructura se puede estimar en función del desempeño de un sistema similar ante un evento peligroso similar. Sin embargo, hay que considerar muchas variables, y dicho proceso probablemente no arroje resultados de calidad. Para obtener resultados óptimos, se debe analizar un evento cuya topografía o terreno y evento peligroso, el tipo y la edad del sistema de infraestructura y los recursos disponibles para restaurar el sistema sean similares. Se deberían realizar los ajustes necesarios en caso de detectar diferencias.

4.2. Método de evaluación en talleres

El método de evaluación en talleres reúne un equipo que cuenta con conocimientos sobre varios aspectos del sistema de infraestructura, como el personal de ingeniería y operaciones que toman decisiones operativas a diario. Como parte de la evaluación, el equipo determina si el sistema posterior al evento se puede operar sin los componentes del sistema de infraestructura que se dañaron o fallaron conforme a la evaluación del desempeño de la Sección 2.

El proceso del taller incluye analizar paso a paso de manera consecutiva las decisiones, los materiales, el personal y las funciones necesarias para recuperar el sistema y lograr que sea operativo en etapas que sean coherentes con los objetivos de desempeño deseados para la comunidad, como se indica en la Tabla 1. Algunos pasos de recuperación se enfocarán en un único componente, pero es posible que otros consideren las redundancias del sistema o métodos alternativos para obtener fuerza laboral y materiales que puedan brindar flexibilidad u opciones. Por ejemplo, en el caso de un sistema de energía que incluye líneas de transmisión, subestaciones de transmisión, subestaciones de distribución y líneas de distribución, los componentes redundantes pueden mejorar un plan para lograr una recuperación en etapas de la energía eléctrica (p. ej. 30% o 60% de funcionamiento).

La redundancia del sistema depende en gran medida del tipo de sistema y de dónde se produce la redundancia. Por ejemplo, muchos sistemas de energía compran energía en masa de distintos proveedores, de los cuales posiblemente ninguno se vea afectado por el evento peligroso. No obstante, la falla de una subestación local puede ocasionar la pérdida del servicio en la zona si no existe redundancia en las líneas de transmisión o distribución. Muchos proveedores de servicios de agua son autónomos y tienen un único suministro de agua. Si se pierde este suministro, es posible que el sistema completo resulte no funcional.

4.3. Método de modelación del sistema

Para evaluar el desempeño del sistema de infraestructura, los modelos analíticos deben incluir la conexión del sistema y el nivel de funcionalidad posterior al evento de los componentes del sistema al igual que la demanda operativa prevista. Muchos sistemas de infraestructura utilizan modelos para evaluar su desempeño en condiciones operativas normales. La mayoría de estos modelos son deterministas y no pueden representar las incertidumbres o las fallas de los componentes y sus efectos en el sistema. Sin embargo, es posible que el operador del modelo pruebe el impacto de uno o dos cortes de los componentes en el sistema al mismo tiempo.

EPANET, un programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (<https://www.epa.gov/water-research/epanet>), es un ejemplo de un programa de aplicación de una red de agua que se utiliza habitualmente. EPANET se utiliza en la industria hídrica para evaluar la funcionalidad de los sistemas de agua dañados. Los usuarios pueden retirar los componentes dañados del sistema (según se determinó por separado mediante un análisis de fragilidad) para evaluar el impacto operativo. Si el daño del sistema es profundo, el modelador puede realizar estudios de la sensibilidad al retirar algunos de los componentes dañados del sistema para determinar cuáles tienen un mayor impacto. Este enfoque se utiliza a veces para analizar el daño provocado por terremotos en los sistemas de agua cuando se esperan fallas de las tuberías de distribución. Las fallas de las tuberías se

agrupan por zona de presión. Luego, el modelador agrega o retira la demanda de las distintas zonas de presión para evaluar el impacto general en la funcionalidad del sistema. Otros modelos del sistema permiten realizar modelos probabilísticos cuando, por ejemplo, se necesitan las probabilidades del suministro; sin embargo, la implementación de este modelo requiere mucho tiempo y puede que su valor sea limitado.

La desventaja de los modelos deterministas es que no pueden incorporar las curvas de fragilidad y otras incertidumbres en el análisis del sistema para predecir mejor el desempeño previsto. Los modelos probabilísticos de evaluación de riesgo se utilizan habitualmente en la industria de la energía nuclear donde las consecuencias de una falla pueden ser extremas. Estos modelos generalmente utilizan la simulación de Montecarlo para calcular la probabilidad de daños y el rango posible del impacto en la funcionalidad del sistema. Estos modelos se desarrollaron para varios sistemas de suministro de agua en masa en la costa occidental para calcular las probabilidades de distribuir agua a las comunidades locales tras varias situaciones hipotéticas de terremotos. Por lo general, estos modelos están patentados. Estos tipos de modelos son efectivos, pero el desarrollo es costoso y su aplicación se ve restringida por el uso específico previsto.

4.4. Costos y tiempo de recuperación del sistema

Costos de recuperación. Los costos de recuperación de primer orden a veces se calculan como un porcentaje del costo del reemplazo de los componentes. Con las estimaciones de la fragilidad, el punto de partida para el cálculo de los costos de recuperación de primer orden se puede basar en el porcentaje de probabilidad de falla. Por ejemplo, si un componente tiene un costo de reemplazo de \$ 1 millón y una probabilidad de falla del 30% (o cuando se aplica para estimar los costos de reparación, un costo promedio previsto), es posible que se estime que tenga un costo de recuperación inicial de \$ 300 000. Cabe destacar que el 30% es un costo promedio esperado y que la incertidumbre de la estimación puede resultar considerable. Algunas instalaciones con una probabilidad de falla del 30% pueden tener un costo de reparación de \$ 500 000 (p. ej. reemplazo completo del tanque – sitio/tuberías/instalación de control intactos) y otras \$ 100 000 (p. ej. reparación de abolladuras en la base del tanque).

Si bien dichas estimaciones resultan convenientes para los costos iniciales de recuperación de primera orden, se puede obtener un costo de recuperación justificado mediante estimaciones detalladas de los costos de compra, envío e instalación del componente, y de los costos que conlleva retirar y eliminar los componentes dañados. Estas estimaciones se pueden actualizar con el tiempo.

Tiempo de recuperación. Las estimaciones del tiempo de recuperación deberían considerar el entorno en el que se realizarán las operaciones, el personal de apoyo y la obtención de equipos y suministros tras un evento peligroso. Por ejemplo, los memorándums de entendimiento o los contratos para brindar apoyo posterior al evento pueden acelerar de manera considerable el proceso de recuperación. La planificación ante la reducción o modificación del personal de apoyo y la tasa deseada de recuperación harán hincapié en los ámbitos de preocupación. A partir de la identificación de los métodos disponibles de transporte para los suministros y materiales entrantes se pueden obtener opciones y flexibilidad durante el proceso de recuperación y el rango de tiempos de recuperación que se pueden prever.

Se necesita una estimación del tiempo de recuperación del sistema de infraestructura, lo que implica el tiempo desde que sucede el evento hasta que recupera el 90% de la funcionalidad (es decir, opera a una capacidad normal) para completar las tablas de objetivos de desempeño (ver Tabla 1 como ejemplo). El enfoque recae en la recuperación de la función del sistema, lo cual puede incluir medidas temporarias hasta finalizar las reparaciones permanentes.

En el caso los componentes que son críticos para la recuperación de la funcionalidad del sistema, los ingenieros de sistemas y el personal de operaciones pueden estimar el tiempo de recuperación de cada componente. Si múltiples componentes críticos están fuera de servicio, el equipo de evaluación tendría en cuenta si la recuperación de los componentes se puede lograr de manera paralela o secuencial.

Consideraciones. Se debería considerar el equipo de emergencia al evaluar la recuperación. En el caso de las funciones sociales, el servicio de infraestructura se puede satisfacer temporalmente con equipos de emergencia, como generadores y baños portátiles. Para brindar otro ejemplo, los camiones cisterna pueden proveer agua a los puntos de distribución locales. Es posible que las comunidades alcancen una funcionalidad mínima del sistema (es decir, funcionalidad del 30%) con el equipo de emergencia.

Se debe tener en cuenta la recuperación de los sistemas con numerosos casos del mismo tipo de daño o falla. Por ejemplo, se deben considerar las líneas eléctricas caídas. Para estimar el tiempo de restauración completa o parcial del sistema, se debe suponer el tiempo que conlleva reparar una línea caída, multiplicarlo por la cantidad total de líneas caídas y dividir el total por la cantidad disponible de personal. El tiempo y el costo de la reparación de una línea eléctrica caída después de un evento peligroso pueden ser mayores que durante el funcionamiento normal. Se deben realizar algunas suposiciones para determinar la disponibilidad del personal. Por ejemplo, el personal local se puede ver afectado por compromisos familiares. Además, es posible que el personal de ayuda mutua se demore días o más si las rutas de transporte o los sistemas de combustible están dañados.

El equipo necesario para las reparaciones puede ser el factor limitante de la recuperación, más que la disponibilidad del personal de reparaciones. Por ejemplo, es posible que se necesiten excavadoras grandes para reparar las tuberías principales y grandes de distribución de agua. Tras un evento peligroso, puede que haya una demanda elevada de excavadoras grandes. El estado o el condado establecerían prioridades de recuperación; una posibilidad es que las excavadoras se asignen primero para la limpieza de escombros de las calles, luego para la restauración del servicio hídrico y finalmente para el servicio de aguas residuales.

La disponibilidad de los materiales de reparación también puede representar un problema. Por ejemplo, a menudo los terremotos ocasionan daños en muchas tuberías de distribución. Las reparaciones requieren abrazaderas, y los proveedores de servicios públicos por lo general solo cuentan con un suministro limitado. También se deben considerar las fuentes y el tiempo que se necesitan para adquirir materiales adicionales. De manera similar, el equipo y los materiales dañados que tienen plazos de entrega largos pueden perjudicar la recuperación. Es posible que se tenga que fabricar una tubería con un gran diámetro para reparar las fallas de la tubería principal de distribución de agua. Las empresas de electricidad pueden demorar meses en reemplazar los transformadores de alto voltaje que se dañaron.

En algunos casos, el evento peligroso también puede dañar otros sistemas de infraestructura que retrasan el trabajo de recuperación (p. ej. los sistemas de transporte que limiten el acceso). Es posible que las líneas eléctricas subterráneas dañadas se encuentren encima del alcantarillado dañado, por lo que este último se deberá restaurar primero porque está a mayor profundidad.

Realizar una línea de tiempo de la secuencia esperada de dichas actividades tras el evento peligroso ayudará a clarificar y documentar los planes y la comunicación de apoyo con otras partes interesadas y miembros de la comunidad.

5. Determinar el desempeño previsto de los grupos de edificios

Determinar el desempeño de los grupos de edificios tiene similitudes y diferencias con respecto a determinar el desempeño de los sistemas de infraestructura. Un grupo de edificios es un conjunto de edificios que tienen una función en común, como viviendas, cuidado de salud o comercios minoristas. Los edificios de un grupo no necesariamente están ubicados en una única área geográfica.

El desempeño de un edificio puede depender o no del desempeño de otro edificio del grupo. La dependencia se puede dar en cuanto a una función específica brindada por el edificio dentro del grupo de edificios en general. Por ejemplo, un edificio del grupo de servicios financieros puede ofrecer almacenamiento de datos; si deja de ser funcional (sin redundancia ni reservas), puede ocasionar que otros edificios que dependen del almacenamiento de datos dejen de ser funcionales. En algunos casos, como los templos, cada edificio de un grupo puede tener independencia de la funcionalidad. En tales casos, la comunidad puede tener una redundancia considerable.

5.1. Curvas de fragilidad de los edificios individuales

Los componentes de los grupos de edificios (p. ej. cada edificio) pueden haber sido diseñados conforme a distintos códigos a lo largo del tiempo y quizás tengan distintos materiales y tipos de construcción. El desempeño previsto de cada edificio, o conjunto de edificios similares en cuanto a estructura, se puede evaluar con las curvas de fragilidad.

El desempeño de un edificio depende de los modos de falla más probables ante un tipo y magnitud de peligro específico. Por ejemplo, el modo de falla más probable puede ser un colapso estructural ante movimientos de la tierra por terremotos extremos o daño del equipo ante inundaciones de nivel de diseño. Si un edificio cuenta con equipos de emergencia para mitigar los efectos de una vulnerabilidad conocida, puede suceder que otro modo de falla se vuelva significativo para dicho edificio.

Los enfoques disponibles para evaluar las curvas de fragilidad de los componentes de un edificio incluyen la opinión de expertos, información empírica sobre los daños y los análisis (ver Tabla 2). Al igual que los componentes del sistema de infraestructura, la opinión de los expertos se puede basar en el tipo de estructura, la fecha de

El Consejo de Tecnología Aplicada (ATC, Applied Technology Council) desarrolló una metodología para evaluar el desempeño de los edificios ante los terremotos para la guía FEMA P-58-1, *Seismic Performance Assessment of Buildings* (Evaluación del desempeño de edificios ante sismos). La metodología del ATC aborda tanto el desempeño estructural como no estructural de un sistema. La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés) desarrolló una guía para evaluar los edificios existentes en el estándar ASCE 41-13, *Evaluación Sísmica y Acondicionamiento de los Edificios Existentes* (Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings) con análisis de Nivel 1, 2 o 3. Si bien estos documentos son muy exhaustivos, una evaluación preliminar de Nivel 1 puede ser suficiente para analizar el componente de un grupo de edificios.

5.2. Desempeño de un grupo de edificios

Luego de determinar el desempeño de los componentes de un grupo de edificios (los edificios individuales), se agrupan todos los componentes para determinar el desempeño previsto del grupo de edificios. En el caso de un grupo de edificios con una gran cantidad de edificios similares, se podría utilizar una muestra representativa para establecer la fragilidad del grupo. Los objetivos consisten en determinar la degradación esperada de la funcionalidad y el tiempo previsto para recuperar una funcionalidad del 90% (ver Tabla 1). Para lograr tal porcentaje de funcionalidad, se podría asumir que todos los componentes tendrán que ser funcionales. Sin embargo, en algunos casos, es posible que algunas medidas temporales permitan una operatividad del 90% al mismo tiempo que uno o más componentes siguen siendo no funcionales. Por ejemplo, se podría hacer el esfuerzo para que una instalación operativa que normalmente funciona durante un turno opere durante dos turnos mientras se restaura la otra instalación.

6. Uso de Hazus

En la década de 1990, el Instituto Nacional de Ciencias de la Construcción (NIBS, National Institute of Building Sciences) lideró un proyecto que se denominó Hazus por la abreviatura de Hazards-US (peligros-EE. UU.) y fue financiado por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA, por sus siglas en inglés) para desarrollar un método exhaustivo a fin de estimar el daño y las pérdidas de los terremotos, inundaciones y huracanes. Los manuales técnicos Hazus para peligros de terremotos, inundaciones y huracanes incluyen curvas de fragilidad de los edificios y muchos sistemas de infraestructura y componentes.

Los peligros de terremotos modelados en Hazus son el movimiento de la tierra, la licuefacción, el deslizamiento de tierras y la ruptura de fallas. En el caso de las inundaciones, se abordan aquellas que tienen lugar tanto en zonas fluviales como costeras. También existe la opción de calcular el daño combinado de los vientos huracanados y las marejadas por medio de la opción de marejada costera en los modelos de huracanes e inundaciones. Las curvas de fragilidad de edificios del modelo de huracanes incluyen los efectos combinados de la presión del viento, los escombros arrastrados por el viento y las filtraciones de lluvia; además, hay curvas específicas para el daño de la caída de árboles para las estructuras residenciales. Las curvas de fragilidad de la infraestructura no se abordaron hasta el momento.

Hazus incluye métodos para cuantificar los peligros, el desempeño previsto de los edificios y sistemas de infraestructura (denominados líneas vitales en Hazus) ante tales peligros, y en algunos casos, los efectos de un evento peligroso para la comunidad en general.

Los manuales técnicos de Hazus ofrecen información exhaustiva sobre las curvas de fragilidad que utilizan y están disponibles en el sitio web de la FEMA <http://www.fema.gov/media-library/assets/documents/24609>. El software de Hazus está disponible en el sitio web de la FEMA <https://msc.fema.gov/portal/resources/hazus>. Para poder ejecutar el paquete completo del software de evaluación de pérdidas, se debe instalar Hazus como una extensión de un sistema de información geográfica disponible en el mercado denominado ArcGIS. Las curvas de fragilidad de terremotos de Hazus se desarrollaron a partir de la opinión de expertos para los siguientes casos:

- Edificios e instalaciones, incluso curvas de capacidad y fragilidad ante temblores, fallas y un desplazamiento altos de la tierra. Una sección especial se enfoca en la pérdida de instalaciones esenciales y de alto potencial. Se incluyen las curvas de fragilidad de 15 categorías de tipos de edificios, entre ellos edificios de altura baja, moderada y alta, construidos con un diseño de código bajo, moderado o alto. Los tipos de edificios incluyeron madera, cinco categorías de acero, cinco categorías de concreto y mampostería reforzada y no reforzada.
- Sistemas de transporte, como carreteras, ferrocarriles, trenes ligeros, autobuses, puertos, transbordadores y aeropuertos.
- Sistemas de servicios públicos de líneas vitales, incluidos el suministro de agua potable, las aguas residuales, los sistemas de petróleo, el gas natural, la energía eléctrica y las comunicaciones.
- Daños provocados en inundaciones, incendios tras un terremoto, liberación de materiales peligrosos, escombros, víctimas, pérdidas sociales y económicas directas, pérdidas económicas indirectas y pérdidas anualizadas.

La Figura 2 muestra un ejemplo de las curvas de fragilidad ante un terremoto de Hazus para los tanques de concreto.

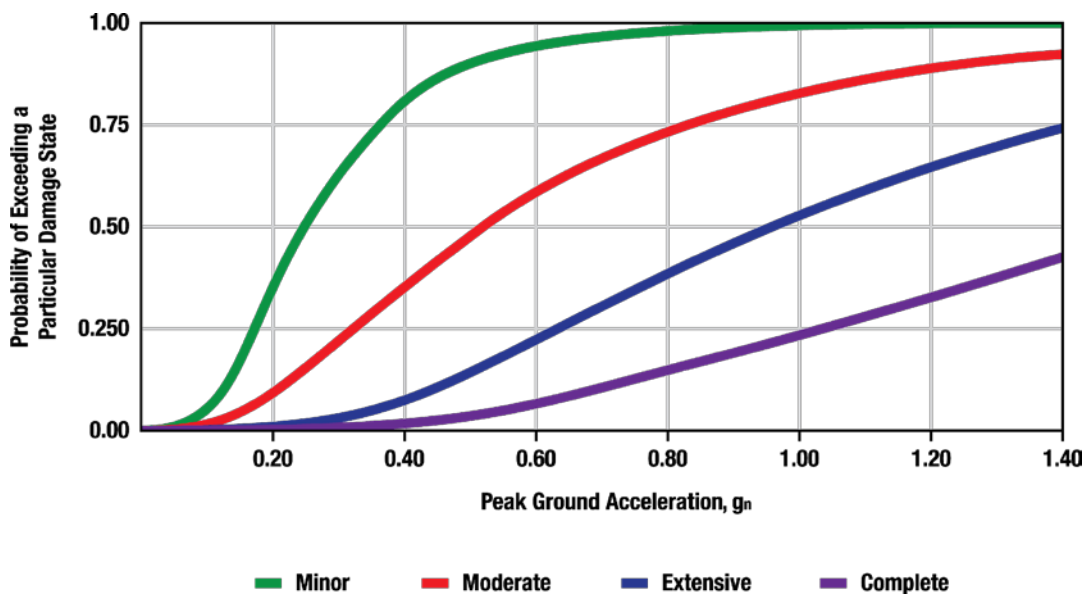


Figura 2. Curvas de fragilidad ante el movimiento de la tierra ocasionado por un terremoto para tanques de concreto sujetos al suelo (después del Capítulo 8 del Manual Técnico de Terremotos de Hazus, Daño Directo a las Líneas Vitales: Sistemas de Servicios [Direct Damage to Lifelines – Utility Systems])

Los términos descriptivos generales del daño son los siguientes:

- **Leve:** daño menor reparable. El componente sigue siendo completamente funcional.
- **Moderado:** daño reparable. El componente se puede reparar y sigue siendo operativo, pero posiblemente con una capacidad o función reducida.
- **Considerable:** inoperable pero reparable.

- **Total:** el componente no se puede reparar de manera razonable o el costo de reparación superaría el costo para reemplazarlo con una instalación nueva.

Los componentes del sistema que presenten niveles de daño leve o moderado se consideran funcionales. Estos términos de descripción del daño también se pueden interpretar en términos del porcentaje del costo de reemplazo o algún parámetro que lo relacione con el tiempo de recuperación.

Por medio de las curvas de fragilidad de la Figura 2 para los tanques de concreto sujetos al suelo se puede estimar su funcionalidad posterior a un terremoto. En el caso de una aceleración máxima de la tierra de $0,40 g_n$ (donde g_n representa la aceleración debido a la gravedad), se puede observar en la Figura 2 que hay una probabilidad del 80% de que el tanque sufra al menos daños leves, una probabilidad del 35% de que sufra al menos daños moderados, una probabilidad del 10% de que sufra al menos daños considerables y una probabilidad del 2% de que sufra daños totales. En función a estas fragilidades, lo más probable es que el tanque sufra daños leves a moderados. Si sufre daños moderados, el tanque es reparable y se los puede reparar mientras sigue operativo, pero posiblemente con una capacidad reducida. Por lo tanto, existe una probabilidad del 90% de que el tanque permanezca operativo ante un nivel de intensidad de aceleración máxima de la tierra de $0,40 g_n$.