



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

FRAMEWORK DE ESTUDIO MULTI-CAPA
PARA RESILIENCIA DE INTERNET CHILENO

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS, MENCIÓN
COMPUTACIÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN COMPUTACIÓN

IVANA FRANCISCA BACHMANN ESPINOZA

PROFESOR GUÍA:
JAVIER BUSTOS JIMÉNEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JOSE MIGUEL PIQUER GARDNER
MAÍRA MARQUES SAMARY
ALONSO SILVA ALLENDE

ESTE TRABAJO HA SIDO PARCIALMENTE FINANCIADO POR NIC CHILE
RESEARCH LABS Y EL PROYECTO CORFO 15BPE-47225

SANTIAGO DE CHILE
2017

Resumen

Chile es un país que sufre regularmente catástrofes naturales como terremotos, tsunamis, aludes, etc. En condiciones de catástrofe mantener el funcionamiento de infraestructuras como las de telecomunicaciones puede significar un gran desafío. Dentro de estas el Internet es una pieza importante pues se ha transformado en la alternativa a las redes telefónicas para comunicarse con otras personas y además permite tener acceso a información sobre los eventos que estén ocurriendo. Sin embargo estas mismas catástrofes pueden afectar de forma negativa el funcionamiento de Internet. Asimismo el funcionamiento de Internet puede verse dañado por otros eventos como ataques cibernéticos o fallos de equipos, cables, antenas, etc.

Para mantener la red de Internet chilena en funcionamiento bajo cualquier evento primero hay que preguntarse ¿qué tan preparado se encuentra el Internet chileno para resistir fallos? a la capacidad de resistir fallos le llamamos robustez. Así, para responder la pregunta anterior es necesario estudiar la robustez del Internet chileno. Esto último requiere además contar con una caracterización de Internet en Chile, qué elementos son los que definen su estructura y cómo se comportan.

Por ejemplo, el Internet chileno podría ser visto como aquella red que se compone por cables, fibras ópticas y diferentes instalaciones físicas distribuidas a lo largo del país, pues es a través de estos equipos que la información viaja de un lugar a otro. Sin embargo esto no necesariamente muestra si los usuarios tienen acceso a Internet, si acaso han perdido acceso al resto del mundo o si han perdido total o parcialmente la conexión dentro del país. Entonces se podría establecer que la red compuesta por conjuntos de redes IP es realmente lo que conocemos como Internet. Sin embargo esta red puede perder funcionalidad si cables o instalaciones físicas son dañadas, y viceversa. Así, la red de Internet realmente estaría compuesta por varias redes distintas interactuando entre sí, interacciones que generan comportamientos nuevos y distintos a los que cada red tuviese por sí sola frente a los mismos fallos. La red de Internet es entonces una red multi-capa (también conocida como red multi-layer o redes interdependientes).

En esta tesis se realizó una revisión sistemática de la literatura existente sobre frameworks de estudio de robustez de redes multi-layer, la cual consideró 57 artículos publicados entre los años 2005 y 2016. En esta revisión se encontraron 4 categorías mayores para clasificar los frameworks: Modelo de redes interdependientes, tipo de métrica para medir robustez, estudios realizados y redes usadas para testear el framework. A partir de la revisión sistemática en esta tesis se propone y justifica el uso de un determinado framework de estudio apropiado para el caso del Internet chileno. Finalmente se ofrece una forma de construir el sistema a partir de datos reales y una implementación en código para analizar el sistema.

A mi papá y al Julio, sé que les habría gustado estar aquí.

Agradecimientos

Quiero agradecerle al proyecto CORFO de “Estudio y recomendaciones sobre la resiliencia de la infraestructura del Internet chileno” (código 15BPE-47225) por el financiamiento entregado para realizar este trabajo de tesis y a Javier por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto.

Le quiero agradecer también a mi mamá y mis abuelos por apoyarme en todo momento y al Pipe por animarme y aconsejarme cuando más lo necesitaba. Y, por supuesto, a la Chili, por correr en su ruedita todas las noches y ser linda, y a la Pequita por sus estornudos y tiritones, gracias por acompañarme y alegrarme todos estos años de universidad. Gracias a todos.

Tabla de Contenido

Introducción	1
1. Motivación y antecedentes	2
1.1. Antecedentes	2
1.1.1. Conceptos	2
1.1.2. Motivación	3
1.2. Preguntas de investigación	4
1.3. Objetivos	4
1.4. Estado del arte	4
2. Herramienta para revisión sistemática	7
2.1. Descripción general del trabajo realizado	7
2.2. Investigación	8
2.3. Diseño	8
2.3.1. Funcionalidades mínimas deseadas	9
2.3.2. Diseño de base de datos	9
2.4. Implementación	11
2.4.1. Descripción del Modelo Plantilla Vista	12
2.4.2. API de la herramienta	12
2.5. Resultados	13
3. Revisión sistemática	17
3.1. Método de investigación	17
3.1.1. Antecedentes y Objetivos	17
3.1.2. Preguntas de investigación	17
3.1.3. Estrategia de obtención de datos	18
3.1.4. Criterios de selección de estudios	21
3.1.5. Proceso de selección	21
3.1.6. Evaluación de calidad	21
3.1.7. Extracción de datos	22
3.1.8. Análisis de datos	22
3.2. Resultados	22
3.2.1. Modelo de redes interdependientes	23
3.2.2. Tipo de métrica usada para el estudio de robustez	26
3.2.3. Estudios realizados por el framework	28
3.2.4. Redes usadas para testear el framework	29

3.3. Discusión	30
4. Elección de framework	37
4.1. La red chilena de Internet	37
4.1.1. Red física	37
4.1.2. Red lógica	38
4.1.3. Interacciones entre redes	38
4.2. Selección de un framework	38
4.2.1. Criterios de selección	39
4.2.2. Framework seleccionado	39
4.2.3. Ejemplo de fallo en cascada	41
5. Propuesta de implementación para redes interdependientes	43
5.1. Mapeo de datos	43
5.1.1. Elección de modelo	43
5.1.2. Construcción de la red física	44
5.1.3. Construcción de la red lógica	44
5.1.4. Mapeo de interacciones entre redes	44
5.2. Implementación del framework	45
5.2.1. Representación de las redes interdependientes	45
5.2.2. Implementación de fallos en cascada	46
5.2.3. Implementación de métricas	46
5.3. Pruebas sobre la implementación	48
Conclusión	48
6. Bibliografía	52
7. Apéndice	58

Índice de Tablas

2.1.	Resumen de la API de la herramienta desarrollada: métodos para añadir . . .	14
2.2.	Resumen de la API de la herramienta desarrollada: métodos para extraer datos	15
2.3.	Resumen de la API de la herramienta desarrollada: métodos para editar . . .	16
2.4.	Resumen de la API de la herramienta desarrollada: métodos para eliminar .	16
3.1.	Consultas realizadas en ScienceDirect, Plos ONE, ACM y Nature	19
3.2.	Consultas realizadas en IEEE Xplore	20
3.3.	Número de papers según repositorio y etapa.	22
3.4.	Desglose de las preguntas de investigación	23
3.5.	Aspectos principales de los frameworks estudiados	24
3.6.	Cantidad de papers publicados por año	31
7.5.	Lista de clasificaciones de estudios	58
7.6.	Lista de papers incluidos en la revisión sistemática	60
7.7.	Lista de papers según modelo y métrica usadas	62
7.8.	Lista de papers según estudios realizados y redes usadas para testeo	63
7.1.	Tabla resumen: parte I	65
7.2.	Tabla resumen: parte II	66
7.3.	Tabla resumen: parte III	67
7.4.	Tabla resumen: parte IV	68

Índice de Ilustraciones

2.1. Diseño de la base de datos	11
3.1. Resultados por modelos	33
3.2. Resultados por métrica	34
3.3. Resultados por estudios	35
3.4. Resultados por tipo de red usada para testear el framework	36
4.1. Ejemplo de fallo en cascada en una red interdependiente con dependencias unidireccionales descritas en el trabajo de Parandehgheibi et al. (Ver [42]) . .	42
5.1. Esquema de representación de redes en el código.	46
5.2. Nodos que satisfacen Node-MTFR en el sistema. Si se remueve el par A1-A2 las redes pierden todas sus interdependencias.	47
5.3. Ejemplo de nodos considerados funcionales para la métrica “ratio de nodos funcionales”.	49

Introducción

En el mundo moderno mantenerse conectados a través de redes de comunicaciones, como por ejemplo la red de Internet, se ha vuelto una necesidad para muchas personas. Un caso relevante es el de mantenerse conectados cuando ocurren catástrofes de cualquier tipo. En eventos catastróficos las redes de telefonía son las primeras en colapsar debido a su uso masivo por personas tratando de contactarse con sus seres queridos para verificar que estos se encuentran bien. Se ha observado en eventos recientes de alertas de tsunamis, terremotos, etc. que la conectividad entre las personas a través de distintas plataformas de comunicación, que hacen uso de la red de Internet, facilita la evacuación de lugares rápida y ordenadamente al evitar que la gente sienta pánico gracias a que pueden contactarse con amigos y familiares [5].

La red de Internet puede verse afectada por estas mismas catástrofes así como por ataques o fallas del sistema. En cualquiera de estos casos el efecto puede dejar a la red fragmentada e incapaz de establecer comunicaciones de manera apropiada. Por lo tanto, es de suma importancia saber qué tan robusta es la red de Internet y cuáles son sus debilidades. Sin embargo las redes no suelen comportarse como sistemas aislados y en general interacciones entre redes distintas pueden ser observadas. Un ejemplo de interacciones entre redes corresponde al caso de las redes de buses con las redes de metro o las redes eléctricas con sus respectivas redes de comunicación. De esta forma para estudiar de manera apropiada la robustez de la red de Internet es necesario analizar su comportamiento en conjunto con las redes con las que interactúa, pues no basta con que la red sea robusta por sí sola, sino que debe ser robusta dentro del sistema en el que se encuentra inmersa.

Capítulo 1

Motivación y antecedentes

1.1. Antecedentes

A continuación se presentarán los datos y antecedentes necesarios para enmarcar el trabajo presentado en esta tesis. En la sección 1.1.1 se verán conceptos necesarios para entender la tesis, los que se repetirán dentro de la misma. En la sección 1.1.2 se explicará la motivación de la presente tesis. En la sección 1.2 se mostrarán las preguntas de investigación, en 1.3 se presentará el objetivo de este trabajo y finalmente en la sección 1.4 se presentará un breve resumen del área que se desea estudiar y cómo se encuentra actualmente.

1.1.1. Conceptos

- **Robustez en redes:** En el ámbito de las redes complejas, la robustez de una red corresponde a la capacidad de una red para resistir fallos y perturbaciones. La robustez de una red puede ayudar a entender diversas situaciones. En medicina, por ejemplo, puede ayudar a descubrir los mejores puntos de vacunación en una zona geográfica para prevenir la expansión de una enfermedad. En ecología puede ayudar a estudiar cómo reacciona un ecosistema frente a la extinción de una especie [55]. Mientras que en la ingeniería ayuda a estudiar el comportamiento de estructuras como el Internet [71] o las redes de distribución eléctrica [8].

La robustez de una red puede ser medida a través de métricas de robustez. Cada métrica tiene un foco particular según el cual evalúa la resistencia a fallos de una red. Este foco puede ser el tamaño de la componente conexas más grande [27, 40, 53], el número de flujos que pueden pasar por la red [43], el umbral de percolación [56], entre otros.

- **Redes interdependientes:** El estudio de redes interdependientes es una subárea de las redes complejas que trata los fenómenos producidos por las interacciones entre redes complejas. El tipo de interacción entre redes puede ser entre nodos, aristas o ambos. Estas interacciones a su vez pueden diferir ampliamente entre distintas redes interdependientes según su comportamiento y la forma en que estas interactúan. Un ejemplo clásico es el de las redes de distribución de energía eléctrica y sus respectivas

redes de comunicación [11]. En este caso se tiene que los nodos dentro de la red de comunicación requieren energía para funcionar, por lo que dependen de los nodos en la red eléctrica que se encargan de distribuir la energía. Dependiendo del modelo, se tiene que algunos nodos en las redes eléctricas pueden depender de la red de comunicaciones para ajustar datos necesarios para su funcionamiento.

- **Red física y red lógica del Internet chileno:** La red de Internet se compone de redes interdependientes con una capa o red física y una capa o red lógica. La red lógica de Internet corresponde al ruteo IP manejado por el Border Gateway Protocol (BGP)[2]. En ella se encuentra el ruteo de los sistemas autónomos (AS, Autonomous Systems)[1], que a su vez corresponden a colecciones de direcciones IP. La red física de Internet es la red compuesta por equipos de ruteo conectados entre sí por cables que transmiten información, entre otros componentes. Ambas redes se relacionan pues la red lógica se encuentra alojada en los equipos de la red física y los equipos de la red física dependen de que los AS alojados en ellos sigan funcionando para considerarse como activos dentro de la red física.

1.1.2. Motivación

Como se vio en la introducción la robustez de la red de Internet es un tema importante, sobretodo en un país propenso a fallos mayores debido a catástrofes naturales como Chile. Por esto se plantea estudiar la robustez de la red chilena de Internet. Para poder estudiar la robustez de esta red no es suficiente estudiarla como red aislada ya que esta interactúa con otras redes que pueden ser muy diferentes en su estructura y funcionamiento. En el caso particular de esta tesis se desea estudiar las redes física y lógica que componen el Internet chileno. Dichas redes, si bien se pueden estudiar por separado (cada una aislada), deberían estudiarse como un conjunto pues de no hacerlo se omitirían las interacciones que ambas redes tienen entre sí, generando una vista incompleta del sistema. Así, es necesario considerar la red física y la red lógica junto a sus interacciones, es decir, se requiere estudiar ambas redes como **redes interdependientes**.

Por lo expuesto anteriormente es que se está llevando a cabo el proyecto CORFO “Estudio y recomendaciones sobre la resiliencia de la infraestructura del Internet chileno” (código 15BPE-47225) en el cual se enmarca esta tesis. Este proyecto tiene como objetivo recolectar los datos de la infraestructura del Internet chileno para estudiar su robustez y, en base a los resultados que se obtengan, entregar un diagnóstico y guías de posibles mejoras que se puedan realizar sobre el Internet en Chile. Actualmente se están recolectando datos sobre la red chilena y una aplicación web para visualizar y testear estos datos está siendo desarrollada¹.

Para poder asistir el estudio de robustez del Internet chileno es necesario contar con una forma de estudiar la robustez en redes tal que se ajuste de manera apropiada al caso de la red de Internet de Chile, la cual difiere en su estructura física de otras redes alrededor del mundo por la influencia que tiene la geografía larga y angosta de Chile. Por lo tanto es necesario contar con un framework de estudio de robustez en redes interdependientes para el caso del

¹La aplicación web se encuentra alojada en <http://yafun.dcc.uchile.cl/>. Sin embargo se requiere contar con un nombre de usuario y clave para acceder.

Internet chileno.

1.2. Preguntas de investigación

Para desarrollar el presente trabajo se plantearon las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es el framework más apropiado para estudiar la robustez del Internet chileno si lo consideramos como el sistema compuesto por la red física y la red lógica de Internet?
- ¿Cómo se caracterizan la red física y la red lógica del Internet chileno y sus interacciones?
- ¿Qué frameworks existen para estudiar la robustez de redes interdependientes?

1.3. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es el de encontrar un framework para el estudio de robustez en redes interdependientes apropiado para el caso de la red chilena de Internet. En este caso se considera que el Internet chileno está compuesto por las redes física y lógica, y es en base a sus interacciones y comportamiento que se debe determinar qué framework es más apropiado para el estudio del caso chileno.

Para cumplir con el objetivo general se tienen los siguientes objetivos específicos:

- Llevar a cabo una revisión sistemática sobre la literatura existente respecto a frameworks para el estudio de robustez de redes interdependientes.
- Establecer criterios para seleccionar un framework apropiado para el estudio del Internet chileno en base a las características del mismo.
- Seleccionar un framework en base a los criterios establecidos. El framework debe ser el más apropiado considerando a este “como un todo”, es decir, el conjunto de metodologías y modelamiento presentado por framework para estudiar redes interdependientes debe ser considerado en su totalidad.
- Establecer una metodología de construcción de sistema interdependiente según el framework elegido.
- Generar una implementación en código del framework elegido para ser integrado dentro del proyecto CORFO de bienes públicos 15BPE-47225.

1.4. Estado del arte

En cuanto a cómo se debe estudiar la robustez en redes interdependientes existen diversos enfoques, los cuales presentan diferentes modelos para construir la red, diferentes tipos de medidas para evaluar la robustez y distintas formas de someter la red a fallos.

Para evaluar la robustez se pueden utilizar medidas relacionadas con *teoría de percolación*, *el tamaño de la componente conexa más grande* o con los *flujos en la red*, entre otras. Dentro de la teoría de percolación se suele utilizar como medida de robustez el ‘orden de la transición’ al acercarse al ‘umbral de percolación’. Entre las transiciones tenemos las de primer y de segundo orden. Una transición de primer orden es aquella tal que al acercarse al umbral de percolación tiene un punto de discontinuidad donde debajo de este no existe una “componente conexa gigante”, esto significa que la red está totalmente fragmentada. Una transición de segundo orden no posee este punto de discontinuidad, por lo que no hay un punto en el cual la red colapsa, si no que esta decae de forma continua frente a un ataque. Al realizar estudios de percolación en redes interdependientes se suele observar una transición de primer orden mientras que en redes aisladas su comportamiento corresponde a una transición de segundo orden.

En [11] Buldyrev et al. realiza estudios de percolación y muestra resultados teóricos para predecir el comportamiento de dos redes interdependientes con correspondencia “uno a uno” entre los nodos de ambas redes, bajo este framework encuentra que para redes interdependientes la relación entre distribución de grado y robustez es opuesta a las de redes aisladas, sentando un primer precedente sobre qué tanto difiere el comportamiento de una red aislada versus redes interdependientes. En sus trabajos, Bashan et al. [9] y Danziger et al. [16] estudian el *umbral de percolación* de redes interdependientes con distintas restricciones espaciales donde encuentran que este tipo de redes es aun más vulnerable que las redes que no poseen restricciones espaciales.

Otros trabajos se centran en observar el comportamiento del *tamaño de la componente conexa más grande* para evaluar la robustez de las redes interdependientes. Nguyen et al. [39] utiliza el tamaño de la componente conexa más grande para evaluar la evolución de las redes dentro del ‘Interdependent Power Network Disruptor optimization problem’, mientras que en [65] se utiliza este parámetro junto a otras métricas para observar el comportamiento y la confiabilidad de redes interdependientes cuyos componentes poseen un tiempo de vida acotado. Schneider et al. [54] usa el tamaño de la componente conexa más grande para medir el efecto de la cantidad de nodos autónomos en redes interdependientes sobre la robustez de las mismas a través de otra medida llamada *R-index* [53] la cual mide el tamaño promedio de la componente conexa más grande de la red luego de ser atacada.

Los *flujos de una red* también pueden ser utilizados para medir su robustez. En estos casos los flujos pueden simbolizar flujos de información, transporte, energía, etc. En su trabajo Pinnaka et al. [43] utiliza la medida ‘flow robustness’ la cual mide el ratio de flujos posibles en la red para estudiar la importancia de la infraestructura crítica de redes interdependientes según cómo son atacadas. Los flujos también pueden ser utilizados para modelar redes como es el caso del trabajo de Outboer et al. [40] el cual estudia la robustez de las redes interdependientes de suministro eléctrico junto a su red de comunicaciones a través de un modelo que utiliza los flujos y capacidades de la red eléctrica para analizar el comportamiento del sistema frente a fallos.

Además de las medidas utilizadas otra característica de los frameworks que estudian la robustez de redes interdependientes es si estos utilizan o no ataques para llevar a cabo el estudio. Estos ataques pueden ser aleatorios o intencionales. En [27] se estudia el efecto de

ataques aleatorios sobre redes interdependientes para estudiar su robustez considerando tanto fallos por carga y sobrecarga de nodos como por interdependencia. Mientras que Berezin et al. [10] estudia ataques intencionales usando como criterio la localización física de los nodos y el largo de los arcos, mostrando la vulnerabilidad de este tipo de redes frente a fallos que pueden ser comparativamente pequeños respecto del tamaño de la red. En [43], mencionado anteriormente, también se observan ataques intencionales cuyo criterio de selección viene dado por medidas de centralidad de los nodos.

Finalmente otra forma de dividir los frameworks para estudiar la robustez de redes multicapa es de acuerdo la estructura del modelo. En particular si el modelo posee arcos dirigidos o no dirigidos para modelar las interacciones. El tipo de arcos utilizados influye en el tipo de interacciones entre las redes interdependientes. Por ejemplo para el caso de arcos no dirigidos la falla de un nodo en una red puede afectar directamente a sus contrapartes en las otras redes pues no hay una claridad en la dependencia, mientras que si las redes son dirigidas el fallo de un nodo sólo afecta a los nodos en las redes interdependientes que lo necesiten a él para funcionar. En ambos casos, dependiendo del framework, esto puede generar fallos en cascada entre las redes interdependientes. Buldyrev et al. [11] utiliza un modelo compuesto por 2 redes interdependientes cuyas interacciones entre redes están dadas por arcos no dirigidos. En este modelo cada nodo de cada red tiene un par del que depende en la otra red. Cuando falla un nodo en una red entonces el nodo al que este está asociado en la otra red también falla. Por otro lado Huang et al. [26] propone un modelo donde las interacciones entre los nodos de las redes que componen el sistema son unidireccionales. En este modelo, a diferencia del anterior, las dependencias son múltiples y a un nodo le basta conservar al menos una de estas dependencias para permanecer funcional. En este trabajo se observa que los pronósticos de tiempo de vida de redes previamente desarrollados no necesariamente representarían la robustez que poseen los sistemas reales.

Capítulo 2

Herramienta para revisión sistemática

Para llevar a cabo una revisión sistemática es necesario almacenar varios datos sobre cada artículo estudiado, estos datos deben permitir la creación de categorías para clasificar los artículos según el objetivo de la revisión sistemática que se esté llevando a cabo. La creación de dichas categorías corresponde a un proceso constante, donde las categorías pueden ser creadas, eliminadas o mezcladas conforme se obtiene una mayor claridad sobre la estructura general de los datos extraídos.

Durante el inicio de la revisión sistemática realizada en el presente trabajo los datos extraídos de los artículos fueron almacenados en una base de datos MySQL¹. Para esto se diseñó una base de datos con algunas categorías de clasificación de papers fijas, sobre la cual se podían agregar nuevas categorías agregando tablas, y se implementó un script capaz de manejar esta base de datos, pudiendo añadir datos en ella. Este método permitía almacenar datos mas no contrastarlos ni estudiarlos fácil y rápidamente, ni tampoco permitía la modificación y creación de nuevas categorías sin pasar por un proceso de re-implementación del script utilizado cada vez. Es por esto que surgió la necesidad de contar con una herramienta que pudiese facilitar y agilizar la revisión sistemática.

2.1. Descripción general del trabajo realizado

El objetivo del trabajo presentado en este capítulo fue el de facilitar y agilizar la realización de la revisión sistemática. Para ello se creó una herramienta en formato de aplicación web que permite agregar, eliminar y modificar datos de artículos que se deseen almacenar, categorías para clasificar los artículos, datos a dichas categorías, agrupar categorías en categorías más amplias en caso de ser necesario y consultar datos sobre los papers según categorías y otros datos como autor, fecha, abstract, etc. El código de la herramienta se encuentra disponible en github².

¹MySQL: <https://www.mysql.com/>

²Respositorio de la herramienta: <https://github.com/ibachman/systematic-review-tool>

Para desarrollar la herramienta primero se investigaron las herramientas ya existentes para asistir revisiones sistemáticas, luego se pasó al diseño de la herramienta y luego, en base al diseño realizado, esta fue implementada.

2.2. Investigación

Considerando el problema de categorización de papers planteado, como primer paso, se procedió a buscar una forma de asistir la revisión sistemática a través de un software. Fruto de esta búsqueda se encontró el software NVivo³, el cual es recomendado para realizar análisis de información cualitativa. Este software permite añadir documentos de varios tipos (texto, audio, etc.), establecer categorías y subcategorías sobre los documentos con patrones visuales para su rápido reconocimiento, re-organizar estas categorías a través de pasos simples como clicar y arrastrar, y consultar las categorías con el objetivo de asistir la comprensión general de los documentos que se encuentran bajo estudio. Por esto NVivo se presentó como una excelente opción para asistir la revisión sistemática, pues permite generar categorizaciones fluidas que pueden cambiar con el proceso de la revisión y además permite extraer datos sobre los documentos y cómo se categorizan, agilizando el análisis posterior de los datos. Sin embargo este software comprende precios muy altos (partiendo en USD 103 para estudiantes) y un periodo de prueba de tan solo 14 días, los cuales se consideraron insuficientes para llevar a cabo una revisión sistemática completa del tamaño que aquí se presenta.

Luego de establecer la infactibilidad de uso del software NVivo por su precio y su corto periodo de prueba se procedió a analizar la factibilidad de desarrollo de un software con las funcionalidades mínimas deseadas de NVivo por parte de la tesista. Para esto se identificaron dichas funcionalidades mínimas deseadas y se hizo una primera estimación del tiempo que tomaría desarrollar este software. Durante esta etapa se determinó que era factible implementar una aplicación web que correspondiese a una versión bastante básica del software NVivo, pero con suficiente funcionalidad para satisfacer los requisitos de facilitar y agilizar la revisión sistemática dada la experiencia previa de la tesista con aplicaciones web, en un periodo inferior a un mes.

2.3. Diseño

Por simplicidad y eficiencia de tiempo se decidió implementar una aplicación web con las funcionalidades mínimas deseadas. Por lo tanto el patrón de diseño utilizado fue el de *Modelo Plantilla Vista* [4] (MTV por sus siglas en inglés) el cual es ofrecido por frameworks como Django⁴ y Flask⁵. A continuación se describen las funcionalidades mínimas deseadas.

³Para más información de NVivo ver: <http://www.qsrinternational.com/what-is-nvivo>

⁴Django: <https://www.djangoproject.com/>

⁵Flask: <http://flask.pocoo.org/>

2.3.1. Funcionalidades mínimas deseadas

El detalle de las funcionalidades mínimas deseadas son:

1. **Manejo de categorías:** Añadir, eliminar y modificar categorías. Con la posibilidad de añadir los campos que se consideren necesarios para describir los datos de una categoría y añadir meta-categorías (agrupación de clasificaciones o datos pertenecientes a una categoría) posteriormente en la clasificación, para facilitar la agrupación de datos.
2. **Manejo de papers:** Permitir la adición y modificación de papers al sistema, solicitando datos mínimos del paper: título, autores, librería, código, año, abstract, resumen, tipo de documento. Además de solicitar datos correspondientes a las categorías que se van añadiendo de acuerdo a los datos que cada categoría contiene.
3. **Extracción de datos:** Se debe contar con una interfaz de búsqueda de papers sobre los papers añadidos que permita filtrar según título, autores, librería, código, año, abstract, resumen, tipo de documento, categorías y subcategorías, que entregue al menos el título del artículo y opcionalmente todos los datos que se desee obtener del artículo.
4. **Flexibilidad:** Cada vez que se añadan categorías, los campos a llenar de un artículo deben ser modificados para poder añadir a qué clasificación pertenece dicho artículo dentro de la categoría. Asimismo al extraer datos sobre los artículos se debe permitir filtrar según las categorías y meta-categorías que se vayan añadiendo.

2.3.2. Diseño de base de datos

Para el diseño de la base de datos se contempló el hecho de que el añadir categorías fuese un proceso que pudiese cambiar en el tiempo y que se pudiesen agregar y eliminar agrupaciones de categorías. En el diseño original se consideró que habrían como máximo 2 niveles para agrupar datos: categorías y subcategorías. A partir de esta asunción se creó la base de datos que se utiliza en la herramienta desarrollada y que se explicará a continuación.

Sin embargo, hay que destacar que al momento de usar la herramienta desarrollada la utilización de estos niveles cambió y las subcategorías pasaron a ser utilizadas como “meta-categorías”, es decir, fueron utilizadas para agrupar datos de una categoría en grupos más generales dentro de la categoría.

Este uso de la base de datos diseñada y de la herramienta no presentó absolutamente ningún problema a nivel de lo que se había programado anteriormente salvo por el hecho de que los nombres originalmente utilizados “categoría” y “subcategoría” ya no se condecían con lo que realmente representaban. Esta situación puede ser solucionada fácilmente refactorizando los nombres de las tablas, mas no se llevó a cabo por no considerarse como una refactorización relevante para la utilización inmediata de la herramienta desarrollada (el cambio en el uso de “subcategorías” a “meta-categorías” ocurrió de forma natural conforme se fue utilizando la aplicación). Por lo anterior, durante esta sección se entenderá que cuando se habla de “subcategorías” en la base de datos se habla de “meta-categoría” a nivel de uso de la aplicación.

Considerando que el ambiente de utilización de la base de datos es una aplicación web se generaron 2 grupos de tablas. En primer lugar están aquellas tablas que se encargan de almacenar qué categorías y subcategorías existen y cómo se relacionan. En segundo lugar tenemos aquellas tablas que efectivamente almacenan los datos contenidos en los papers, categorías y subcategorías. Ambos grupos guardan relación a través de la aplicación web desarrollada, sin embargo sus tablas no se relacionan directamente entre sí a nivel de la base de datos.

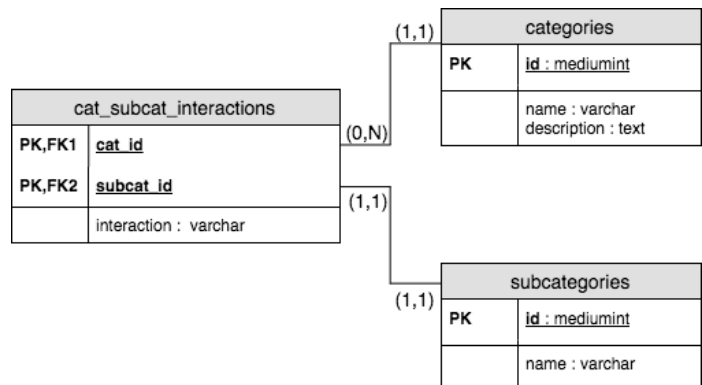
En la figura 2.1, en el grupo 1 tenemos a aquellas tablas que se encargan de almacenar qué categorías y subcategorías existen, y cómo estas se relacionan. Para ello existen las tablas `categories`, `subcategories` y `cat_subcat_interactions`. Las tablas `categories` y `subcategories` se encargan de almacenar qué categorías y subcategorías existen respectivamente. Para las categorías se almacena el nombre que el usuario le entrega a la categoría y una descripción de la misma, además al almacenar la existencia de la categoría en la tabla se le otorga a la misma un id correspondiente a un número entero. Lo mismo ocurre con las subcategorías salvo que este no almacena una descripción. La tabla `cat_subcat_interactions` almacena pares de elementos de la tabla `categories` y `subcategories` además del nombre de la interacción entre ambas dada por el usuario, donde una meta-categoría dada puede relacionarse únicamente con una categoría (las meta-categorías corresponden a agrupaciones de elementos de una categoría). A partir de las filas que contengan estas tablas son creadas tablas para almacenar los datos de cada categoría y subcategoría, además de tablas que establezcan la relación entre elementos de `categories` y `subcategories`. Es decir el grupo 1 contiene los metadatos para generar las tablas de categorías y subcategorías del grupo 2.

En el grupo 2 tenemos a aquellas tablas que contienen los datos sobre los artículos y las categorías a las que cada uno pertenece. Las tablas `paper`, `author` y `paper_has_authors` son las tablas con las que se inicia la base de datos, mientras las tablas `cat1`, `subcat1`, `paper_has_cat1` y `cat1_has_subcat1` corresponden a tablas de ejemplo las cuales van siendo creadas conforme se crean nuevas categorías y subcategorías (almacenadas en `categories` y `subcategories`). La tabla `paper` se encarga de almacenar los datos mínimos sobre un paper como lo son el título, la librería de la cual se extrajo, el nombre con el cual se identifica como archivo, el año de publicación, su abstract, un resumen de su contenido y la fuente (journal, proceedings). La tabla `author` almacena autores y su afiliación, mientras que la tabla `paper_has_authors` almacena qué papers tienen qué autores.

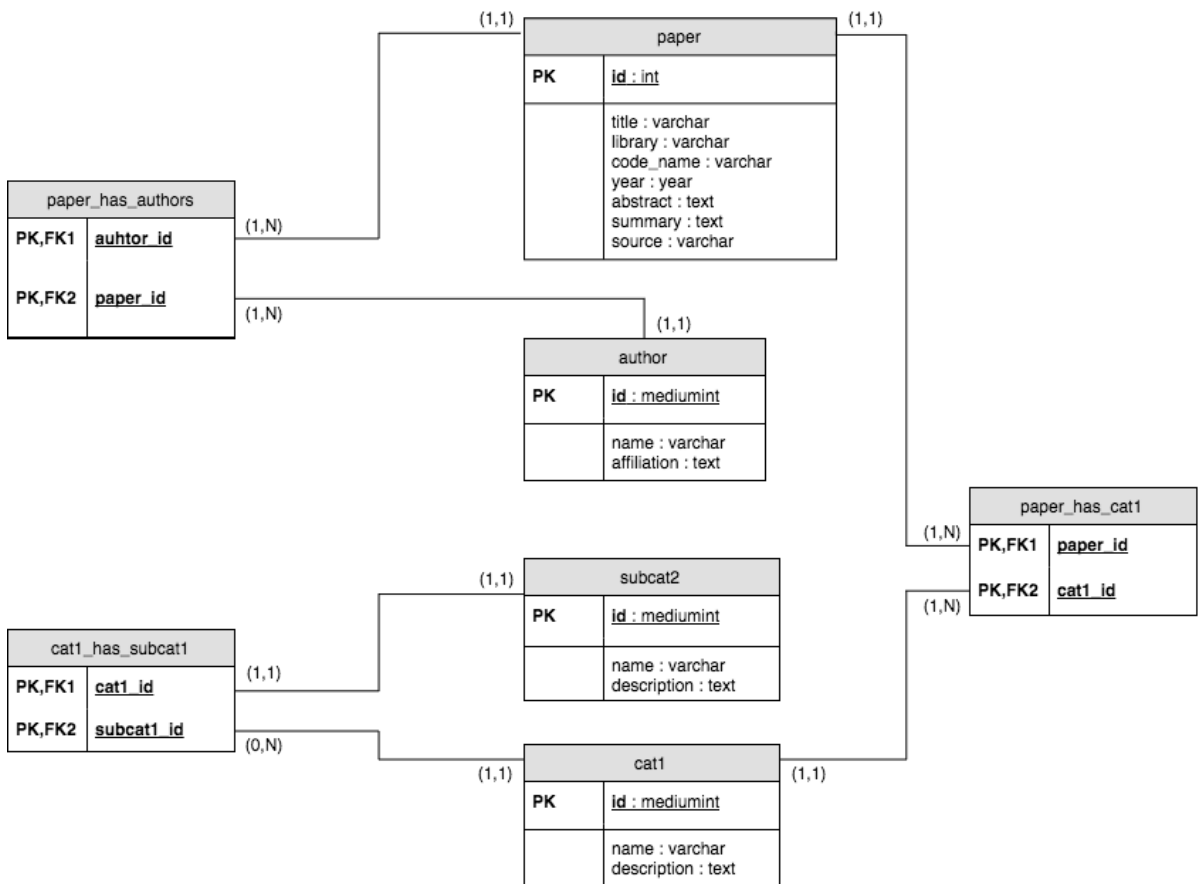
Por otro lado, la tabla `cat1` se genera a partir de la categoría almacenada en `categories` cuyo id es 1, y corresponde a la tabla que almacena los datos que contiene esta categoría. Este tipo de tablas puede ser editada para contener más columnas además de las columnas mínimas que son `id`, `name` y `description`. Por ejemplo, si se desea almacenar la métrica usada en un paper para medir la robustez de una red, puede ser conveniente almacenar además del nombre y la descripción de la métrica qué datos o parámetros de la red requiere la métrica para su cálculo, en tal caso se podría añadir la columna `parameters`.

La tabla `paper_has_cat1` se crea al generar la tabla `cat1` y establece con cuales elementos de `cat1` se relaciona un determinado paper. El caso de `subcat1` es similar al de `cat1` en cuanto a que es creada a partir de la subcategoría almacenada en `subcategories` cuyo id es 1. Finalmente la tabla `cat1_has_subcat1` establece qué elementos de una categoría pertenecen

a una meta-categoría dada, en este caso la subcategoría 1 pertenece a la categoría 1.



(a) Grupo 1



(b) Grupo 2

Figura 2.1: Diseño de la base de datos

2.4. Implementación

Para implementar la aplicación web se utilizó Flask junto con MySQL. Flask corresponde a un micro framework web escrito en python, el cuál fue elegido con base en el conocimiento

previo de la tesista, lo que permitiría acortar el tiempo de implementación. Además se decidió utilizar MySQL pues al momento de la implementación ya se contaba con una base de datos con datos en MySQL.

2.4.1. Descripción del Modelo Plantilla Vista

A continuación se explicará qué lenguajes fueron utilizados para programar la herramienta, según el patrón de diseño MTV.

1. Modelo: El modelo fue implementado como una base de datos MySQL de acuerdo al diseño propuesto en la sección 2.3.2.
2. Plantilla: Las plantillas, siguiendo el framework Flask, corresponden a páginas en HTML. El estilo de estas páginas vino dado por un documento CSS extraído de Bootstrap⁶ y su comportamiento fue implementado utilizando Javascript⁷ y funcionalidades ofrecidas por Flask.
3. Vista: Las vistas fueron implementadas siguiendo las indicaciones que entrega el framework Flask.

2.4.2. API de la herramienta

La API de la herramienta desarrollada se compone de llamados que se dividen en 4 grupos principales: las llamadas para añadir elementos en la base de datos, las llamadas para solicitar información, las llamadas para editar elementos de la base de datos y las llamadas para eliminar elementos de la base de datos.

En la tabla 2.1 se encuentran listadas las llamadas para añadir elementos en la base de datos. Entre ellas encontramos llamadas para añadir papers, autores, categorías y subcategorías (meta-categorías) para clasificar los papers. Además se encuentran llamadas para añadir clasificaciones y columnas a cada categoría y meta-categoría. Las clasificaciones corresponden a un dato o fila en las categorías y meta-categorías, y las columnas corresponden a las propiedades que deseamos almacenar sobre una clasificación como se explicó en la sección 2.3.2.

Las llamadas para solicitar información o extraer datos se pueden ver en la tabla 2.2. Con estas llamadas se puede obtener la información almacenada sobre papers, autores, categorías, subcategorías (meta-categorías), clasificaciones dentro de las categorías y subcategorías, y las propiedades de cada uno de ellos. Estas propiedades corresponden a las columnas o elementos importantes que definen a los datos almacenados. Por ejemplo, en el caso de los papers sus propiedades corresponden a las columnas dentro de la tabla y las categorías a las que pertenece.

En el caso de las llamadas para editar datos (ver tabla 2.3) se tiene que se pueden editar

⁶Bootstrap: <http://getbootstrap.com/>

⁷Javascript:<https://www.javascript.com/>

datos sobre los autores, los papers, las clasificaciones de las categorías y las clasificaciones de las subcategorías. En el caso de la edición de datos de clasificaciones, tanto para categorías como subcategorías, se tiene que la llamada incluye un `row_id` el cual corresponde al identificador de la clasificación dentro de la categoría o subcategoría que la contiene.

Finalmente en la tabla 2.4 se pueden ver las llamadas para eliminar elementos en la base de datos. Aquí se pueden eliminar papers, autores, clasificaciones y propiedades de categorías y subcategorías, y las categorías y subcategorías que hayan sido previamente creadas.

2.5. Resultados

Una vez implementadas las funcionalidades mínimas deseadas se migraron los datos desde la base de datos inicial a la base de datos de la herramienta utilizando un script para facilitar la tarea. Cabe destacar que la primera revisión de artículos publicados entre los años 2005 y 2015 (35 papers) ya había sido realizada y almacenada en la base de datos inicial desde la cual se migraron los datos, por lo que sólo restaba el año 2016 (22 papers). A partir de este punto todo almacenamiento o consulta de datos de la revisión sistemática fue realizada utilizando la herramienta desarrollada.

El uso de esta herramienta significó una gran disminución en el tiempo invertido para añadir y modificar datos respecto al método inicialmente utilizado de agregar datos directamente a través de un script a una base de datos. Con la nueva herramienta se pasó de revisar, de manera exhaustiva, 2.9 papers por semana a 7.3 papers por semana. Esto pudo ser observado al comparar la revisión de los papers del año 2016, para la cual se utilizó la herramienta, con la revisión de los papers publicados entre 2005 y 2015.

Además la herramienta permitió generar agrupaciones de categorías específicas en categorías más generales en un tiempo inferior a un día hábil. Las clasificaciones determinadas en este punto son las que componen la revisión sistemática presentada en el capítulo 3. Asimismo esta herramienta permitió generar resultados sobre el comportamiento y las tendencias de las clasificaciones en un tiempo aproximado de ocho horas.

Tabla 2.1: Resumen de la API de la herramienta desarrollada: métodos para añadir

Add	
<code>/api/add/paper/</code>	Añade un paper a la base de datos
<code>/api/add/author/</code>	Añade un autor a la base de datos
<code>/api/add/category/</code>	Añade una nueva categoría a la base de datos
<code>/api/add/subcategory/</code>	Añade una nueva subcategoría a la base de datos
<code>/api/add/column/category/<cat_id></code>	Añade una nueva columna a la tabla de la categoría <code>cat_id</code>
<code>/api/add/column/subcategory/<subcat_id></code>	Añade una nueva columna a la tabla de la subcategoría <code>subcat_id</code>
<code>/api/add/data/category/<cat_id></code>	Añade una clasificación (o fila de datos) a la categoría <code>cat_id</code>
<code>/api/add/data/category/<cat_id>/subcategory/<subcat_id></code>	Añade una clasificación (o fila de datos) a la subcategoría <code>subcat_id</code> de la categoría <code>cat_id</code>

Tabla 2.2: Resumen de la API de la herramienta desarrollada: métodos para extraer datos

Request	
<code>/api/request/data/paper/<paper_id>/</code>	Obtiene los datos del paper <code>paper_id</code>
<code>/api/request/data/author/</code>	Obtiene los datos de todos los autores
<code>/api/request/data/category/<cat_id></code>	Obtiene todas las clasificaciones (o filas) de la categoría <code>cat_id</code>
<code>/api/request/data/subcategory/<subcat_id></code>	Obtiene todas las clasificaciones (o filas) de la subcategoría <code>subcat_id</code>
<code>/api/request/data/subcategories/category/<cat_id></code>	Obtiene los id de las subcategorías asociadas a la categoría <code>cat_id</code>
<code>/api/request/headers/category/<cat_id></code>	Obtiene las propiedades que tiene una clasificación en la categoría <code>cat_id</code>
<code>/api/request/headers/subcategory/<subcat_id></code>	Obtiene las propiedades que tiene una agrupación en la subcategoría <code>subcat_id</code>
<code>/api/request/headers/paper/</code>	Obtiene las propiedades que tiene un paper
<code>/api/request/headers+subcategories/<cat_id></code>	Obtiene las propiedades que tiene una categoría <code>cat_id</code> más los nombres de sus subcategorías
<code>/api/request/headers+subcategories/norep/<cat_id></code>	Obtiene las propiedades que tiene una categoría <code>cat_id</code> más los nombres de sus subcategorías descontando subcategorías repetidas

Tabla 2.3: Resumen de la API de la herramienta desarrollada: métodos para editar

Edit	
<code>/api/edit/data/paper/<paper_id>/</code>	Edita los datos de un paper con <code>paper_id</code>
<code>/api/edit/data/author/<author_id></code>	Edita los datos del autor con <code>author_id</code>
<code>/api/edit/category/<cat_id>/row/<row_id></code>	Edita el dato de la categoría <code>cat_id</code> cuyo identificador es <code>row_id</code>
<code>/api/edit/category/<cat_id>/subcategory/<subcat_id>/row/<row_id></code>	Edita el dato de la subcategoría <code>subcat_id</code> perteneciente a la categoría <code>cat_id</code> cuyo identificador es <code>row_id</code>

Tabla 2.4: Resumen de la API de la herramienta desarrollada: métodos para eliminar

Delete	
<code>/api/delete/category/<cat_id></code>	Elimina la categoría <code>cat_id</code>
<code>/api/delete/subcategory/<subcat_id>/category/<cat_id></code>	Elimina la subcategoría <code>subcat_id</code>
<code>/api/delete/column/<column_name>/category/<cat_id></code>	Elimina la columna <code>column_name</code> de la tabla de la categoría <code>cat_id</code>
<code>/api/delete/data/author/<author_id></code>	Elimina al autor <code>author_id</code>
<code>/api/delete/data/category/<cat_id>/row/<row_id></code>	Elimina el dato de la categoría <code>cat_id</code> contenido en la fila <code>row_id</code> mostrada en pantalla
<code>/api/delete/data/subcategory/<subcat_id>/row/<row_id></code>	Elimina el dato de la subcategoría <code>subcat_id</code> perteneciente a la categoría <code>cat_id</code> contenido en la fila <code>row_id</code> mostrada en pantalla

Capítulo 3

Revisión sistemática

En esta sección se presentará la revisión sistemática llevada a cabo sobre la literatura existente respecto a frameworks para el estudio de robustez de redes interdependientes. Para llevar a cabo esta revisión sistemática se utilizó el protocolo propuesto por Kitchenham en [30].

3.1. Método de investigación

3.1.1. Antecedentes y Objetivos

Dada la problemática de analizar la robustez de redes interdependientes se desea responder la siguiente pregunta **¿Qué frameworks existen para estudiar la robustez de redes interdependientes?** Hasta donde tiene conocimiento la tesista este problema particular no ha sido abordado previamente en el marco de una revisión sistemática.

Esta revisión tiene como objetivos identificar y describir frameworks que estudien la robustez de redes multilayer y generar una caracterización detallada de estos frameworks en cuanto a los modelos, técnicas, métricas, entre otros.

3.1.2. Preguntas de investigación

A continuación se presentan las preguntas que se utilizaron durante la revisión sistemática para cada documento estudiado. Estas preguntas a su vez han sido desglosadas en subpreguntas para la realización de la revisión sistemática.

P.I.1. ¿Qué aspectos de las redes estudia el framework?

P.I.2. ¿Cómo es el modelo utilizado por el framework?

P.I.3. ¿Cómo se validó el framework?

3.1.3. Estrategia de obtención de datos

La búsqueda de estudios primarios fue realizada en los siguientes repositorios: ScienceDirect¹, PLOS ONE², Nature³, ACM digital library⁴ e IEEE Xplore⁵. Estos repositorios fueron escogidos por estar entre los más relevantes dentro del área de ciencias de la computación y redes complejas.

A continuación se muestra la estructura para la búsqueda de papers dentro de los repositorios. Se utilizan los conectores lógicos **AND**, **OR** y **NOT** para mostrar la estructura de la búsqueda. Los puntos debajo de un conector corresponden a elementos o grupos de elementos separados por dicho conector.

- **AND**
 - **OR**
 - * percolation
 - * robustness
 - * resilience
 - **OR**
 - * interdependent network(s)
 - * multilayer network(s)
 - * multi-layer network(s)
 - * network of networks
 - * cascading failure(s)
 - **NOT**
 - * neural

Esta consulta se puede resumir en la siguiente frase "buscar aquellos papers que hablen de robustez, de redes interdependientes y que no hablen de redes neuronales".

En la tabla 3.1 se pueden observar las consultas realizadas en cada repositorio salvo IEEE Xplore, cuyas consultas se encuentran en la tabla 3.2. En el caso del repositorio IEEE Xplore se tuvo que realizar 4 consultas diferentes pues la consulta tiene un máximo de 15 términos de búsqueda⁶, los papers obtenidos de este repositorio corresponden a la unión de los papers obtenidos por cada consulta.

¹<http://www.sciencedirect.com/>

²<http://journals.plos.org/plosone/>

³<http://www.nature.com/>

⁴<http://dl.acm.org/>

⁵<http://ieeexplore.ieee.org>

⁶Ver <http://ieeexplore.ieee.org/search/advsearch.jsp?expression-builder>

Tabla 3.1: Consultas realizadas en ScienceDirect, Plos ONE, ACM y Nature

Repositorio	Consulta
ScienceDirect	TITLE-ABSTR-KEY("network of networks" OR "cascading failure" OR "interdependent network" OR "multilayer network" OR "multi-layer network" OR "multi-layer networks" OR "multilayer networks" OR "interdependent networks") AND TITLE-ABSTR-KEY(percolation OR robustness OR resilience) AND NOT TITLE-ABSTR-KEY(neural)
Plos One	(abstract:"interdependent network" OR abstract:"interdependent networks" OR abstract:"multilayer network" OR abstract:"multilayer networks" OR abstract:"multi-layer network" OR abstract:"multi-layer networks" OR abstract:"cascading failure" OR abstract:"network of networks" OR title:"interdependent network" OR title:"interdependent networks" OR title:"multilayer network" OR title:"multilayer networks" OR title:"multi-layer network" OR title:"multi-layer networks" OR title:"cascading failure" OR title:"network of networks") AND (abstract:"percolation" OR abstract:"robustness" OR abstract:"resilience" OR title:"percolation" OR title:"robustness" OR title:"resilience") AND NOT (abstract:"neural" OR title:"neural")
ACM	acmdlTitle:(+(interdependent networkinterdependent networksmultilayer networkmultilayer networksmulti-layer networkmulti-layer networksnetwork of networkscascading failure") +(percolation robustness resilience) -neural) OR recordAbstract:(+(interdependent networkinterdependent networksmultilayer networkmultilayer networksmulti-layer networkmulti-layer networksnetwork of networkscascading failure") +(percolation robustness resilience) -neural)
Nature	(percolation OR robustness OR resilience) AND ("multilayer networks" OR "interdependent networks" OR "multi-layer networks" OR "multilayer network" OR "interdependent network" OR "multi-layer network" OR "network of networks" OR "cascading failure" OR "cascading failures")

Tabla 3.2: Consultas realizadas en IEEE Xplore

Repositorio	Consulta
IEEE Xplore	(“Abstract”:percolation OR “Abstract”:robustness OR “Abstract”:resilience) AND (“Document Title”:.QT.interdependent network.QT. OR “Document Title”:.QT.multilayer networks.QT. OR “Document Title”:.QT.multi-layer networks.QT. OR “Document Title”:.QT.multi-layer network.QT. OR “Document Title”:.QT.multilayer network.QT. OR “Document Title”:.QT.interdependent networks.QT. OR “Document Title”:.QT.network of networks.QT. OR “Document Title”:.QT.cascading failure.QT.) AND NOT (“Document Title”:neural OR “Abstract”:neural)
	(“Abstract”:percolation OR “Abstract”:robustness OR “Abstract”:resilience) AND (“Abstract”:.QT.interdependent network.QT. OR “Abstract”:.QT.multilayer networks.QT. OR “Abstract”:.QT.multi-layer networks.QT. OR “Abstract”:.QT.multilayer network.QT. OR “Abstract”:.QT.interdependent networks.QT. OR “Abstract”:.QT.network of networks.QT. OR “Abstract”:.QT.cascading failure.QT.) AND NOT (“Document Title”:neural OR “Abstract”:neural)
	(“Document Title”:percolation OR “Document Title”:robustness OR “Document Title”:resilience) AND (“Document Title”:.QT.interdependent network.QT. OR “Document Title”:.QT.multilayer networks.QT. OR “Document Title”:.QT.multi-layer networks.QT. OR “Document Title”:.QT.multi-layer network.QT. OR “Document Title”:.QT.multilayer network.QT. OR “Document Title”:.QT.interdependent networks.QT. OR “Document Title”:.QT.network of networks.QT. OR “Document Title”:.QT.cascading failure.QT.) AND NOT (“Document Title”:neural OR “Abstract”:neural)
	(“Document Title”:percolation OR “Document Title”:robustness OR “Document Title”:resilience) AND (“Abstract”:.QT.interdependent network.QT. OR “Abstract”:.QT.multilayer networks.QT. OR “Abstract”:.QT.multi-layer networks.QT. OR “Abstract”:.QT.multi-layer network.QT. OR “Abstract”:.QT.multilayer network.QT. OR “Abstract”:.QT.interdependent networks.QT. OR “Abstract”:.QT.network of networks.QT. OR “Abstract”:.QT.cascading failure.QT.) AND NOT (“Document Title”:neural OR “Abstract”:neural)

3.1.4. Criterios de selección de estudios

Para seleccionar qué papers estudiar en detalle se aplicaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión sobre los papers obtenidos.

- **Criterios de inclusión:**
 - El paper está escrito en inglés
 - El paper es un estudio primario (journal o proceeding)
 - El paper fue publicado entre enero de 2005 y diciembre de 2016
 - El paper habla sobre frameworks para estudiar la robustez en redes interdependientes
 - El paper realiza conclusiones sobre el trabajo presentado
- **Criterios de exclusión:**
 - El paper no se encuentra disponible en línea
 - El paper habla de redes neuronales
 - El paper no es concluyente
 - El paper no presenta un estudio con datos simulados o reales que utilice el framework presentado
 - El paper es un survey

3.1.5. Proceso de selección

Los papers estudiados fueron seleccionados por 3 investigadores (la tesista más 2 estudiantes) de acuerdo a los criterios de inclusión y exclusión. Cada uno de los investigadores debió leer tanto el título como el abstract de cada paper obtenido durante la primera etapa de recolección. Aquellos papers aceptados por la mayoría de los investigadores pasaron a la siguiente etapa de extracción y clasificación de datos, la cual fue llevada a cabo únicamente por la tesista. Como parte de la documentación se mantuvieron los motivos de rechazo en los casos correspondientes.

En la tabla 3.3 se muestra la cantidad de papers encontrados en cada repositorio en la etapa inicial y cuántos papers de cada uno quedaron luego de la primera revisión. Cabe destacar que no se encontraron repeticiones de papers entre los distintos repositorios.

3.1.6. Evaluación de calidad

Para asegurar su calidad, las siguientes preguntas debieron ser respondidas positivamente por el paper.

- ¿El tema del paper es descrito apropiadamente?
- ¿El framework es descrito en detalle?
- ¿Es el modelo utilizado por el framework explicado apropiadamente?

Tabla 3.3: Número de papers según repositorio y etapa.

Repositorio	Cantidad de papers encontrados	Cantidad de papers luego de la primera revisión
ScienceDirect	90	22
Plos One	14	2
ACM	10	1
Nature	104	14
IEEE Xplore	74	18
Total	292	57

- ¿El paper muestra conclusiones y resultados?
- ¿Los resultados mostrados por el paper son concretos y completos?

3.1.7. Extracción de datos

De cada paper se extrajo el nombre, la fuente, el área principal, autores y su afiliación, las preguntas de investigación y el abstract. Esta extracción fue llevada a cabo por la tesista.

3.1.8. Análisis de datos

Para realizar un análisis exhaustivo de los documentos los investigadores se guiaron por el desglose de las preguntas de investigación. El desglose de las preguntas se muestra en el cuadro 3.4. Las preguntas allí mostradas corresponden a las subpreguntas que se desprenden de las preguntas de investigación mostradas anteriormente.

3.2. Resultados

Luego de analizar la literatura quedaron 57 papers para ser revisados de manera exhaustiva. Sobre ellos se realizó un estudio del contenido específico de cada uno. Este estudio identificó y clasificó aspectos relevantes comunes dentro de los frameworks encontrados. La tabla 3.5 muestra una vista general de la clasificación, mientras que el detalle de cada aspecto es presentado en su correspondiente subsección.

La subsección 3.2.1 muestra la clasificación de los frameworks según el tipo de modelo que cada framework utiliza. La subsección 3.2.2 identifica el tipo de métricas utilizadas en cada framework para medir la robustez del sistema interdependiente. En la subsección 3.2.3 se muestran los principales estudios realizados por los frameworks de la literatura estudiada. Finalmente en la subsección 3.2.4 se muestra el tipo de redes sobre las que cada artículo testeó su framework.

PI	Pregunta	Respuesta posible
PI.1.1	¿Qué estudios realiza el framework?	Nombre del estudio
		Descripción del estudio
PI.1.2	¿Qué medida es utilizada para medir la robustez?	Nombre de la medida
		Interpretación de los valores que entrega la medida
PI.1.3	¿Qué parámetros de las redes mide el framework?	Conjunto de parámetros utilizado por la medida
PI.1.4	¿Qué supuestos hace el framework?	Lista de supuestos que hace el framework
PI.2.1	¿El framework propone un modelo o usa uno existente?	$\{propone\ un\ modelo,\ usa\ uno\ existente\}$
PI.2.2	¿Cómo es el modelo estudiado?	Nombre del modelo
		Descripción del modelo
PI.2.3	¿El modelo describe arcos o nodos especiales?	$\{sí,\ no\}$
		tipo de nodos y su descripción
		tipo de arcos y su descripción
PI.2.4	¿Cómo son las interacciones descritas por el modelo?	$\{dirigido,\ no\ dirigido,\ ambos\}$
		descripción de interacciones de los nodos dentro de una red
		descripción de interacciones de los nodos fuera de una red
PI.3.1	¿Qué datos se utilizaron para obtener los resultados?	$\{simulados,\ reales,\ ambos\}$

Tabla 3.4: Desglose de las preguntas de investigación

3.2.1. Modelo de redes interdependientes

Cada framework supone el uso de un modelo de redes interdependientes en el cual se definen los tipos de interacciones entre nodos dentro de una misma red, los tipos de interacciones entre nodos de diferentes redes y los tipos de nodos que pueden haber. El modelo utilizado en un determinado framework indica el tipo de red que se desea analizar, dependiendo del caso el modelo puede ser aplicable a redes con comportamientos específicos o para redes en general. De acuerdo a los papers estudiados para efecto de este survey se identificaron 8 clasificaciones de modelos: “tipo one-to-one” (29), “dependencias múltiples” (8), “red eléctrica acoplada” (7), “transmisión de carga entre redes” (6), “mezcla de interacción intra/inter red” (4), “mapeo” (2), “cadena de suministro” (1) y “definido por probabilidades” (1).

Tabla 3.5: Aspectos principales de los frameworks estudiados

Aspecto	Resumen
Modelo de redes interdependientes	Ocho clasificaciones: “tipo one-to-one” [11, 54, 46, 15, 49, 17, 22, 52, 12, 28, 62, 13, 60, 61, 35, 14, 65, 57, 16, 9, 6, 10, 34, 47, 23, 21, 58, 68, 36], “dependencias múltiples” [45, 44, 19, 51, 13, 39, 29, 33], “red eléctrica acoplada” [27, 40, 26, 38, 42, 24, 41], “transmisión de carga entre redes” [70, 66, 25, 63, 72, 64], “mezcla de interacción intra/inter red” [18, 69, 37, 20], “mapeo” [67, 7], “cadena de suministro” [59] y “definido por probabilidades” [48].
Tipo de métrica para medir robustez	Ocho clasificaciones: “cantidad de elementos” [54, 9, 39, 57, 29, 38, 51, 40, 18, 25, 13, 14, 33, 66, 15, 27, 26, 23, 20, 62, 72, 68, 36, 37, 69, 17, 21, 35, 63, 22, 12, 59, 64, 28, 60, 61, 6, 24, 67], “punto de quiebre” [11, 49, 47, 42, 16, 65, 19, 29, 57, 51, 10, 18, 15, 46, 61, 66, 27, 25, 22, 36, 20, 34], “tiempo” [67, 16, 9, 19, 15, 17, 7], “probabilidad” [11, 46, 52, 48], “costo” [45, 44, 67], “largo de camino” [70, 12, 58], “ratio” [6] y “desempeño” [41].
Estudios realizados	Siete clasificaciones principales: “tamaño de la componente gigante” [11, 65, 54, 9, 39, 29, 51, 57, 40, 18, 33, 25, 13, 14, 26, 66, 27, 15, 28, 62, 34, 72, 68, 36, 58, 37, 69, 17, 21, 22, 12, 59, 20], “acoplamiento” [49, 54, 9, 45, 16, 19, 60, 29, 38, 51, 40, 14, 25, 18, 33, 23, 66, 61, 28, 20, 62, 72, 68, 36, 58, 37, 24, 22, 52, 64], “percolación” [11, 54, 9, 16, 19, 29, 51, 57, 18, 26, 46, 10, 23, 27, 15, 17, 37, 36, 72, 20], “ataques intencionales” [39, 15, 13, 25, 14, 26, 70, 61, 66, 12, 64, 20, 62, 68, 58, 24, 52, 69], “carga y capacidad” [45, 44, 25, 14, 70, 27, 61, 66, 59, 7, 63, 35, 68, 64], “optimización” [67, 39, 45, 42, 44, 33, 7] y “costo” [67, 45, 44, 33, 7, 35].
Redes usadas para testear el framework	Dos clasificaciones: “simuladas” [11, 67, 47, 16, 45, 44, 65, 6, 29, 57, 38, 19, 10, 14, 13, 25, 18, 15, 66, 61, 27, 59, 34, 62, 20, 64, 28, 36, 58, 37, 69, 35, 24, 22, 52, 48, 17] y “simuladas y reales” [49, 9, 54, 39, 42, 60, 51, 40, 33, 41, 70, 23, 26, 46, 12, 63, 21, 68, 72, 7].

La clasificación “tipo one-to-one” contiene a todos aquellos modelos cuya principal característica es que las interacciones entre redes son uno a uno con dependencia bidireccional, es decir, cada nodo solo puede estar conectado a un único nodo en otra red. Si un nodo falla entonces su nodo dependiente también falla y viceversa. Los modelos que se encuentran dentro de esta clasificación típicamente no presentan interacciones entre nodos a nivel de intra-red [11, 54, 46, 15, 49, 17, 22, 52, 12, 28, 62, 13], sin embargo existen modelos en esta clasificación que presentan variaciones en cuanto a sus interacciones internas o características

generales como es el caso de [60, 61, 35, 14] donde se tiene que al interior de cada red hay cargas y capacidades donde se pueden generar fallas si la carga que recibe un arco o nodo excede su capacidad, [65] donde cada componente tiene un ‘tiempo de vida promedio’ luego del cual falla.

Siguiendo una línea similar, [57] considera un modelo que introduce el concepto de ‘recuperación’ donde con cierta probabilidad los arcos pueden reestablecer conexión entre nodos desconectados, [16, 9, 6, 10] introducen espacialidad al modelo donde los arcos tienen largo y para que dos nodos de distintas redes se puedan conectar estos deben estar a una cierta distancia, [34] mezcla la noción de ‘tiempo de vida’ y de espacialidad recién mencionados. En [47] los arcos entre redes tienen pesos en base a los cuales se estudian puntos de transición de fase. En [23, 21, 58, 68, 13] se admite que no necesariamente todos los nodos poseen una contraparte, pero si la tienen es única y dependen uno del otro como se describió anteriormente. Liu et al. [36] presenta el caso donde si un nodo falla su contraparte puede perder sus arcos con cierta probabilidad, el peor caso es aquel en el que se pierden todos los arcos, el cual es equivalente al modelo “one-to-one” original.

Los modelos tipo “dependencias múltiples” tienen como principal característica que entre redes los nodos se pueden relacionar con múltiples otros nodos. Dentro de estos modelos están aquellos que establecen relaciones de soporte-dependencia dirigidas entre nodos de distintas redes donde un nodo sigue funcionando siempre y cuando al menos uno de sus nodos de soporte se encuentre funcionando [45, 44, 19, 51, 13]. También encontramos aquellos cuya relación entre nodos de distintas redes tiene dependencias no dirigidas donde los nodos se dan soporte mutuamente, de esta forma basta que cada nodo esté conectado a al menos un otro nodo en la otra red para mantenerse funcionando [39, 29, 33]. Finalmente dentro de estos también podemos encontrar variaciones como es el caso de [45, 44] que además de presentar relaciones tipo soporte-dependencia dirigidas se tiene que al interior de cada red hay cargas y capacidades donde se pueden generar fallas si la carga que recibe un arco o nodo excede su capacidad.

En el caso de la clasificación “red eléctrica acoplada” tenemos modelos que se distinguen de los demás por modelar la red eléctrica junto a alguna otra red. Típicamente se estudia el par ‘red eléctrica-red de control’, pero también es posible encontrar otros acoplamientos. Dentro del primer caso tenemos que los modelos manejan siempre 2 redes donde una de ellas modela de la red eléctrica, y la otra modela la red de control (Control Network o Supervisory Control And Data Acquisition). En esta última se suele separar entre nodos que representan routers o fuentes de información y centros de control cuya función es redistribuir. Dentro de estas podemos distinguir entre aquellas que modelan los arcos y nodos con cargas y capacidades eléctricas mínimas y/o máximas para el correcto funcionamiento de la red eléctrica [27, 40, 24] y aquellas que no [26, 38, 42]. Un único modelo presenta a la red eléctrica acoplada a una red distinta de la red de control [41], aquí la red eléctrica es acoplada a la red de distribución de gasolina la cual depende del suministro eléctrico para funcionar.

En la clasificación “transmisión de carga entre redes” hay exactamente 6 papers [70, 66, 25, 63, 72, 64] en estos la característica principal es que los arcos y/o nodos poseen cierta carga y capacidad tal que si un nodo falla la carga de este se redistribuye dentro de la red y entre redes. Es interesante destacar una posible aplicación al mundo real presentada en [70]

donde las redes pueden ser vistas como el par de redes de transporte bus-metro donde se transfiere la carga de pasajeros.

En “mezcla de interacción intra/inter red” se tienen [18, 69, 37, 20]. Esta clasificación contiene a aquellos modelos tales que existe más de un tipo de interacción entre redes [18, 69, 20] o dentro de las redes [36], es decir, existen distintos tipos de arco y dependiendo del tipo de arco se define qué ocurre con sus vecinos en otras redes o dentro de la red si un nodo falla o es desconectado.

“Mapeo” por otro lado contiene a aquellos modelos que representan redes que deben ser ‘mapeadas’ o ‘ruteadas’ en otras redes. De esta forma una de las redes depende de la estructura de la otra y del tipo de mapeo que se hace sobre esta. En esta clasificación se encuentran [67, 7].

La clasificación “cadena de suministro” contiene a aquellos modelos cuya característica principal es representar sistemas de cadenas de suministro. Dentro de esta clasificación se encuentra [59] donde se modela una red física que representa la cadena misma de suministro (productor, distribuidor, etc.) y una red cibernética, compuesta por sistemas computacionales, que representa el sistema de control digital de la cadena de suministro.

Finalmente en la clasificación “definido por probabilidades” se encuentran aquellos modelos cuyo comportamiento se encuentra enteramente definido por probabilidades. Aquí se encuentra [48] en cuyo modelo cada nodo tiene una cierta probabilidad de falla y al fallar un nodo la probabilidad de que sus vecinos en otra red de fallen puede aumentar, disminuir o mantenerse.

3.2.2. Tipo de métrica usada para el estudio de robustez

Los frameworks utilizan una variedad de métricas para estudiar la robustez de una red frente a fallos. Un mismo framework puede utilizar una o más de una métrica para medir la robustez. Las métricas para medir la robustez de una red utilizadas en el framework determinan cuáles son los aspectos que el framework considera como determinantes para definir a una red como robusta o frágil. En este estudio se identificaron 8 clasificaciones: “cantidad de elementos” (39), “punto de quiebre” (22), “tiempo” (7), “probabilidad” (4), “costo” (3), “largo de camino” (3), “ratio” (1) y “desempeño” (1).

Las métricas de tipo “cantidad de elementos” corresponden a todas aquellas que midan la cantidad de algún parámetro, como por ejemplo la cantidad de nodos en la componente conexas más grande, o bien que extraigan un valor de acuerdo a la cantidad de un parámetro tal que la dimensión en la cual este se expresa se conserva, como es el caso del promedio de vecinos de un nodo. Dentro de este tipo de métricas podemos distinguir a aquellas que miden la cantidad de nodos que permanecen funcionales luego de que ocurre una falla en la red (con su subsecuente falla en cascada) [54, 9, 39, 57, 29, 38, 51, 40, 18, 25, 13, 14, 33, 66, 15, 27, 26, 23, 20, 62, 72, 68, 36, 37, 69, 17, 21, 35, 63, 22, 12, 59, 64, 28], aquellas que miden la cantidad de nodos perdidos luego de la falla [60, 61, 6, 24] y las que miden la cantidad de caminos redundantes que hay de una red en otra en los casos en que se utilizan modelos

de “mapeo” [67].

En el caso de la clasificación “punto de quiebre” tenemos métricas tales que miden en qué punto ocurre un quiebre de la red. Algunos ejemplos son la cantidad de nodos o arcos que se deben remover para el colapso total de la red, el tiempo de vida de la red antes de su colapso, etc. Para el caso de redes interdependientes el colapso es abrupto luego de que se pasa el punto de quiebre. En esta clasificación encontramos a aquellas que buscan el número de nodos que se pueden remover antes de que la red colapse [11, 47, 42, 16, 19, 29, 57, 51, 10, 18, 15, 46, 22, 36, 20], aquellas que en el caso de tenerse redes con carga consideran cual es la capacidad de carga crítica para que la red colapse en caso de que fallen nodos [61, 66, 27, 25], las que cuentan el número crítico de arcos a desconectar para que colapse la red [42, 49], las que consideran qué tan acopladas pueden estar las redes interdependientes [19] y aquellas que miden el tiempo esperado antes del colapso [65, 34].

La clasificación “tiempo” contiene a aquellas métricas donde se mide el tiempo que toma algún proceso dentro de las redes interdependientes. En estos casos la duración de dichos procesos determina qué tan bien se encuentra funcionando la red frente a situaciones adversas, lo que convierte a estas métricas en medidas de robustez del sistema. Dentro de los documentos estudiados encontramos métricas que miden el número de iteraciones que toma una falla en cascada [16, 9, 19, 15, 17], el tiempo que tiene un usuario antes de perder la disponibilidad de servicios provistos por la red [7] y el tiempo promedio de retardo o *delay* en una red [67].

Dentro de la clasificación “probabilidad” encontramos métricas que evalúan la robustez de acuerdo a qué tan probable es que ocurra algún evento que sea determinante para la robustez de las redes interdependientes. En el estudio realizado se encontraron 4 métricas. En [11] se observa qué tan probable es que aún exista una componente conexa gigante mutuamente conectada dentro del sistema interdependiente, mientras que [46, 52] observan qué tan probable es que un nodo se encuentre conectado a la componente conexa más grande y que dos nodos cualesquiera se encuentren conectados entre sí, respectivamente. Finalmente en [48] se estudia que tan confiable es una red según la distribución en probabilidad del tamaño de fallo en cascada.

Las métricas que se encuentran en la clasificación “costo” miden que tan costoso es aumentar la robustez de una red hasta un cierto punto. Esto puede ocurrir mediante la adición de arcos o nodos, el cambiar nodos de dependientes a autónomos, etc. Los siguientes trabajos utilizan métrica de tipo “costo” para medir qué tanto cuesta aumentar la robustez de las redes interdependientes frente a fallos [45, 44, 67].

En la clasificación “largo de camino” se encuentran aquellas métricas que miden qué tan bien conectada se encuentra la red respecto al largo de sus caminos, donde a más cortos sean los caminos entre nodos, en mejores condiciones se encuentra la red. [70, 12, 58]

La clasificación “ratio” contiene a aquellas métricas que observan como alguna característica de la red se distribuye en otra. En esta clasificación encontramos una única métrica en [6] la cual mide la tasa de nodos que fallan por iteración durante un fallo en cascada, con el objetivo de medir qué tan abrupta es la misma.

Finalmente la clasificación “desempeño” contiene a aquellas métricas que miden el rendi-

miento del sistema interdependiente. En este caso hay que notar que el rendimiento de las redes va a estar definido según el tipo de sistema y qué se espera de él. En [41] se evalúa que tan bien rinde la red respecto a su rendimiento óptimo esperado.

3.2.3. Estudios realizados por el framework

Otra cualidad que caracteriza a los frameworks es el tipo de estudios que realizan para evaluar la robustez de los sistemas interdependientes, además de las métricas. Cada framework puede realizar diversos estudios donde, por ejemplo, evalúa el impacto que puede tener el alterar ciertas variables de las redes interdependientes que están siendo analizadas sobre la robustez. Según los papers analizados en este estudio se identificaron 7 clasificaciones principales: “tamaño de la componente gigante” (33), “acoplamiento” (30), “percolación” (20), “ataques intencionales” (18), “carga y capacidad” (14), “optimización” (7) y “costo” (6). Para ver el detalle de todas las clasificaciones ver la tabla 7.5.

En el caso de la clasificación “tamaño de la componente gigante” se tienen aquellos frameworks que estudiaron cambios en el tamaño de la componente conexas más grande del sistema interdependiente al someterlo a diferentes condiciones. Este estudio puede ser tanto el foco principal para estudiar la robustez de las redes dentro del framework como información complementaria. Estudiar el ‘tamaño de la componente conexas más grande’ es relativamente común dentro de los documentos estudiados, presentándose en un total de 33 papers [11, 65, 54, 9, 39, 29, 51, 57, 40, 18, 33, 25, 13, 14, 26, 66, 27, 15, 28, 62, 34, 72, 68, 36, 58, 37, 69, 17, 21, 22, 12, 59, 20].

La clasificación “acoplamiento” hace referencia a los estudios que observan el efecto que tiene el acoplamiento de las redes interdependientes en la robustez. El acoplamiento de redes interdependiente corresponde a cómo están interconectadas las redes, típicamente se estudian criterios de acoplamiento o ‘fuerza’ del acoplamiento. Algunos ejemplos de criterios de acoplamiento son acoplar nodos de grado alto con nodos de grado bajo, acoplar nodos de igual grado, acoplar aleatoriamente, etc. Por otro lado la ‘fuerza del acoplamiento’ se refiere a la cantidad de nodos acoplados entre redes. Este estudio fue realizado por un total de 30 papers [49, 54, 9, 45, 16, 19, 60, 29, 38, 51, 40, 14, 25, 18, 33, 23, 66, 61, 28, 20, 62, 72, 68, 36, 58, 37, 24, 22, 52, 64].

Se considera que un framework realizó estudios de “percolación” si estudió el umbral de percolación de las redes interdependientes o si realizó estudios sobre medidas que se basan en teoría de percolación [56]. Dentro del contexto de los estudios de percolación se tiene que $1 - p$ es la probabilidad de que un nodo falle o se desconecte. El umbral de percolación, típicamente denotado como p_c , representa el valor crítico tal que si $p < p_c$ entonces en la red ya no es posible identificar una ‘componente conexas gigante’. A menor p_c , más robusto es considerado el sistema interdependiente (pues esto implica un mayor valor de $1 - p_c$). Se interpreta en el conexto de medir la robustez de redes interdependientes que un menor p_c implica que es posible desconectar un mayor número de nodos antes de llegar al punto en que el sistema colapsa. Al estudiar percolación pueden ocurrir fases de transición de primer y segundo orden. Las fases de transición de segundo orden son características de redes aisladas las cuales decaen de forma continua conforme se aumenta el valor de $1 - p$. Las transiciones de

primer orden corresponden a redes donde ocurre un decaimiento abrupto conforme aumenta $1 - p$, el punto donde ocurre dicho decaimiento corresponde a p_c . Las transiciones de primer orden son características de las redes interdependientes. En total 20 papers realizan estudios de percolación [11, 54, 9, 16, 19, 29, 51, 57, 18, 26, 46, 10, 23, 27, 15, 17, 37, 36, 72, 20].

La clasificación “ataques intencionales” contiene a todos aquellos frameworks que realizan ataques intencionales y observan su efecto en las redes. En este contexto para que un ataque se considere intencional este debe utilizar algún parámetro determinista para escoger el nodo o arco que desea atacar. Estos ataques pueden realizarse según medidas de centralidad o valores característicos del sistema como lo es el caso de la carga de un nodo en redes con cargas, capacidades y flujos. Un total de 18 papers realizan estudios de ataques intencionales [39, 15, 13, 25, 14, 26, 70, 61, 66, 12, 64, 20, 62, 68, 58, 24, 52, 69].

Los estudios de “carga y capacidad” se enmarcan en el contexto de frameworks que utilizan modelos que asumen que al menos una de las redes participantes tiene carga (eléctrica, pasajeros, etc.), y por ende, capacidades mínimas o máximas de tolerancia de carga, tal que si se excede algún límite se genera una falla. Estos estudios observan el efecto que tiene alterar ciertas variables que definen la capacidad de carga tienen los distintos elementos de las redes participantes en la robustez, pues al alterar estos parámetros se cambia el comportamiento de fallos en cascada por sobrecarga (o por falta de carga). En esta revisión se encontraron 14 papers que estudiaron la carga y capacidad [45, 44, 25, 14, 70, 27, 61, 66, 59, 7, 63, 35, 68, 64].

Dentro de la clasificación de estudios “optimización” se encuentran los frameworks que realizan optimizaciones para probar o aumentar la robustez de una red. Algunos ejemplos particulares de esto son [39] donde se desea identificar los nodos críticos de una red interdependiente para maximizar la destrucción de la misma y [45] donde se quiere minimizar el costo de aumentar la robustez de las redes interdependientes. Un total de 7 papers presentan frameworks que caen dentro de esta clasificación [67, 39, 45, 42, 44, 33, 7].

La clasificación “costo” contiene a aquellos frameworks que realizan estudios de costos para aumentar la robustez del sistema interdependiente. Estos costos pueden corresponder a costos de agregar arcos, agregar nodos, desacoplar nodos, etc. Los estudios de costos pueden considerar la relación costo-beneficio o el costo por sí solo de realizar dichas mejoras en la red. Se encontraron 6 papers cuyos frameworks realizan estudios de costo [67, 45, 44, 33, 7, 35].

3.2.4. Redes usadas para testear el framework

Dados los requisitos exigidos a cada paper para ser considerado dentro de este estudio todo paper debe probar su framework sobre redes ya sean reales o simuladas. Dentro de este estudio se encontraron 2 categorías de redes testeadas: “simuladas” (37) y “simuladas y reales” (20).

Aquellos frameworks dentro de la clasificación “simuladas” utilizaron únicamente redes simuladas para probar sus frameworks, algunos ejemplos de redes simuladas corresponden a Erdős-Renyi, Power-Law y Random-Regular. En total 37 papers testean únicamente sobre redes simuladas [11, 67, 47, 16, 45, 44, 65, 6, 29, 57, 38, 19, 10, 14, 13, 25, 18, 15, 66, 61, 27,

59, 34, 62, 20, 64, 28, 36, 58, 37, 69, 35, 24, 22, 52, 48, 17].

Finalmente los framework pertenecientes a la clasificación “simuladas y reales” corresponden a aquellos que utilizaron tanto redes reales como redes simuladas para su testeo, es decir, si bien puede que hayan utilizado redes puramente simuladas para su testeo al menos una de las redes de prueba utilizadas corresponde a una red real. Los sistemas acoplados pueden corresponder a redes puramente reales como es el caso de [70] donde se utiliza la red interconectada de transporte público de Beijing, o mixtas como es el caso de [9] donde se utiliza la red eléctrica de Europa y la de Estados Unidos acopladas a redes Random Regular. Un total de 20 papers se encuentran dentro de esta categoría [49, 9, 54, 39, 42, 60, 51, 40, 33, 41, 70, 23, 26, 46, 12, 63, 21, 68, 72, 7].

3.3. Discusión

Basada en la revisión conducida y los 4 principales aspectos identificados, la discusión se centrará en analizar la evolución general de área de estudio de robustez en redes interdependientes y las tendencias de las categorías predominantes de cada aspecto. En las tablas 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4 del apéndice se encuentra el resumen de las clasificaciones a las que pertenece cada uno de los papers estudiados. En las tablas 7.8 y 7.7 se encuentran las listas de combinaciones de estudios versus redes de testeo y de modelos versus métricas respectivamente, con los papers presentes en cada una de las combinaciones. Además en la tabla 7.6 del apéndice se encuentran los títulos y citas de todos los papers estudiados en esta revisión.

Como se puede apreciar en la tabla 3.6 el uso de frameworks para estudiar la robustez en redes interdependientes no comienza hasta el año 2010 con el trabajo de Buldyrev et al. [11]. Aún así el área no suma una cantidad mayor de papers hasta el año 2013, en particular durante la revisión sistemática no se encontraron papers que presentasen frameworks en el año 2012. Así, a partir del 2013 el área se mantiene y presenta un importante crecimiento pasando de 8 papers el año 2014 a 15 el año 2015 y 22 durante 2016. Lo cual representa un aumento de casi el triple de artículos entre el año 2014 y el 2016.

En cuanto a las tendencias de modelos, como se puede ver en la figura 5.3d la categoría más popular corresponde a la “tipo one-to-one”, presente en un 50.9% de los papers estudiados en la etapa final, sobrepasando por mucho a la segunda categoría más popular de “dependencias múltiples” que cuenta con tan sólo un 14% de los artículos estudiados. Tal como se puede apreciar en la figura 3.1a el modelo utilizado en el primer artículo del área [11] también se encuentra dentro de los modelos “tipo one-to-one”. Sin embargo esta tendencia no queda totalmente establecida hasta el año 2015 donde un 46.7% de los artículos de dicho año presenta un modelo “tipo one-to-one”, porcentaje que aumenta a un 54.5% en el año 2016. Entre los años 2010 y 2013 aparecen otras variedades de modelo como “mapeo”, “dependencias múltiples” y “red eléctrica acoplada”, los cuales fueron perdiendo popularidad en el tiempo. Recientemente se han presentado nuevos tipos de modelo, sin embargo aún no hay suficientes publicaciones para juzgar si estos se seguirán desarrollando.

Tabla 3.6: Cantidad de papers publicados por año

Año	Número de papers publicados	Porcentaje de papers publicados en journals	Porcentaje de papers publicados en proceedings	Porcentaje de papers publicados respecto al total
2005	0	0 %	0 %	0 %
2006	0	0 %	0 %	0 %
2007	0	0 %	0 %	0 %
2008	0	0 %	0 %	0 %
2009	0	0 %	0 %	0 %
2010	1	100 %	0 %	1.8 %
2011	2	0 %	100 %	3.5 %
2012	0	0 %	0 %	0 %
2013	9	55.6 %	44.4 %	15.8 %
2014	8	75 %	25 %	14 %
2015	15	86.7 %	13.3 %	26.3 %
2016	22	81.8 %	18.2 %	38.6 %

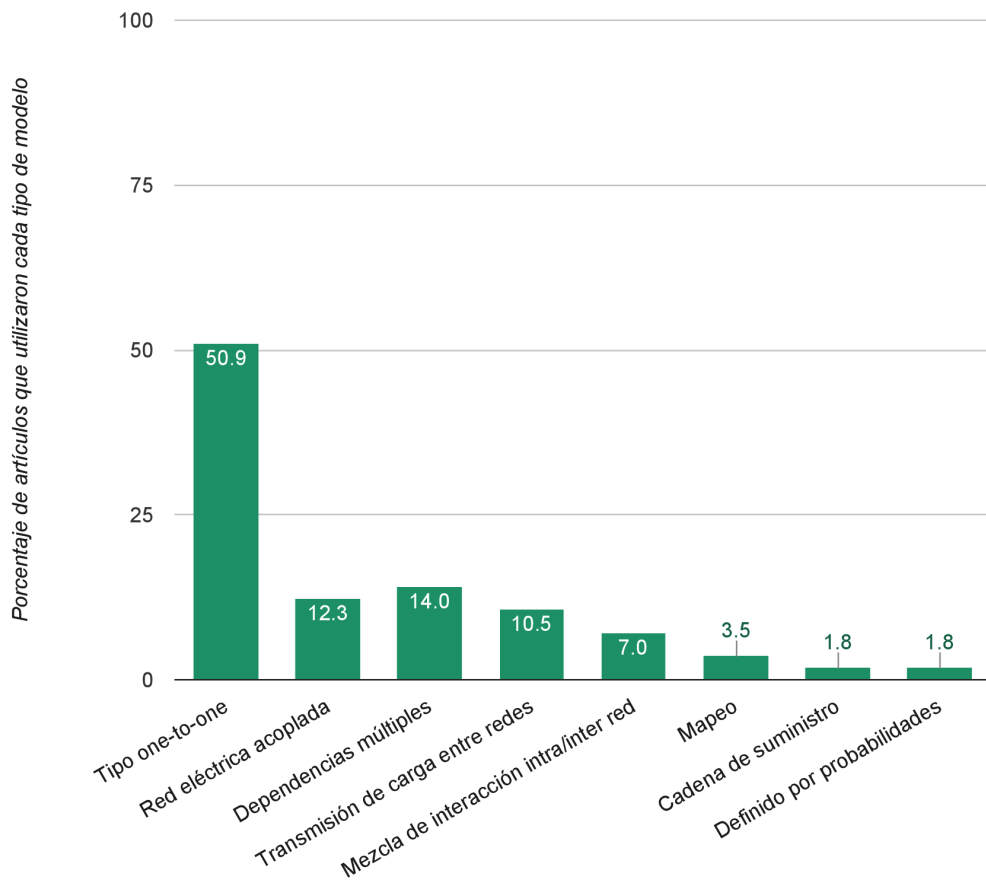
Dentro de la categoría métricas se puede observar en la figura 3.2a que las métricas de tipo “cantidad de elementos” predominan con un 68.4 % de los artículos estudiados. Las métricas de tipo “punto de quiebre” le siguen en segundo lugar, apareciendo como métrica de robustez en un 38.6 % de los artículos estudiados. Como se puede apreciar en la figura 3.2b, otros tipos de métrica como “costo”, “tiempo” y “probabilidad” surgen durante el año 2013, sin embargo su popularidad termina por decaer en el tiempo. Asimismo se puede observar que el uso de métricas de “punto de quiebre” decae durante el año 2016, pasando de ser utilizadas en un 53.3 % de los artículos publicados el año 2015 a un 18.2 % de los artículos el año 2016. Por otro lado las métricas de tipo “cantidad de elementos” mantienen un crecimiento sostenido a partir del 2013, tal que en el último año este tipo de métrica es utilizada en un 77.3 % de los papers publicados en dicho periodo.

Para la categoría de estudios realizados, de la figura 3.3a, se puede apreciar que hay 4 estudios populares: “tamaño de la componente gigante” utilizado en un 57.9 % de los artículos, “acoplamiento” utilizado en un 52.6 % de los artículos, “percolación” utilizado en un 36.8 % de los artículos y “ataques intencionales” utilizado en un 31.6 % de los artículos. Los estudios de “tamaño de la componente gigante” y “acoplamiento” mantienen un crecimiento sostenido en el tiempo a partir del año 2013 como se aprecia en la figura 3.3b. Este no ha sido el caso del uso de estudios de “percolación” lo cuales pierden su popularidad durante el año 2016 pasando de ser usados en un 40 % de los papers publicados en 2015 a un 22.7 % en el año 2016. Los estudios de “costo” y “optimización” son utilizados en un porcentaje no menor de los artículos publicados en 2013 (44.4 % y 22.2 % respectivamente), sin embargo esto no se mantuvo en los años siguientes. Recientemente estudios de “ataques intencionales” y de “carga y capacidad” se han posicionado dentro de los estudios más populares siendo realizados por un 40.9 % y un 27.3 % de los papers publicados durante el 2016. Cabe destacar que dentro de la categoría de estudios realizados varios fueron realizados por menos de 3 artículos (ver tabla 7.5). El número de este tipo de estudios poco usados ha aumentado con el pasar de los años partiendo en 2 estudios de este tipo durante el año 2011, 1 durante 2013, 3 durante

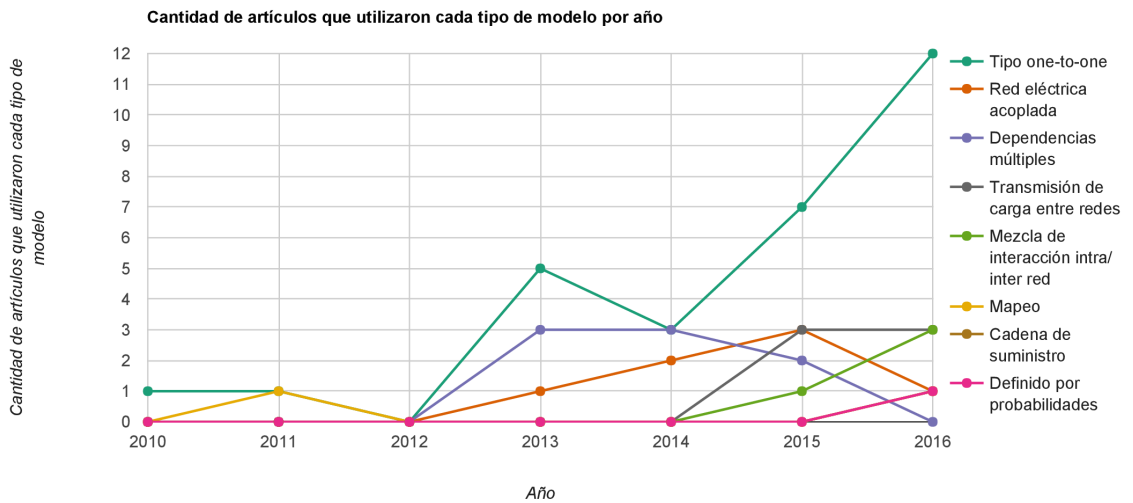
2014, 2 durante 2015 y 7 durante el año 2016. Lo que da cuenta de una tendencia al alza de diversificación de tópicos y métodos para estudiar la robustez en redes interdependientes.

En la categoría de redes testeadas vemos que el tipo de redes para testear frameworks que se utilizan es mayormente de tipo “simuladas” con un 64.9% de los papers estudiados mientras que el uso de redes “simuladas y reales” se queda bastante atrás con un 35.1% de los papers estudiados (ver figura 3.4a). Sin embargo podemos observar en la figura 3.4b que esta disparidad no fue tremendamente significativa entre los años 2010 y 2014. Es durante el año 2015 y 2016, con el aumento de papers publicados en el tema, que la disparidad se vuelve marcada con una diferencia de un 45.5% entre el número de papers que utilizaron redes de testeo de tipo “simuladas” y el número de papers que utilizaron redes de testeo de tipo “simuladas y reales”.

Finalmente, se mostrarán los 5 escenarios, o combinaciones de aspectos, más comunes dentro de los frameworks estudiados. En concordancia con los resultados previamente discutidos se tiene que el escenario más común, con un 15.8% de los artículos, corresponde al de aquellos frameworks que utilizan modelos “tipo one to one”, métricas de “cantidad”, realizan estudios de “tamaño de la componente gigante” y utilizan redes “simuladas” para testear el framework. En segundo lugar, con un 12.3% de los papers, tenemos un escenario igual al primero salvo por el tipo de métrica, la que en este caso corresponde a métricas de “punto de quiebre”. En tercer lugar, con un 10.5% de los papers, se tiene nuevamente un escenario casi igual al anterior salvo por el estudio que realiza que en este caso corresponde a estudios de “percolación”. En cuarto (10.5%) y quinto (8.8%) lugar tenemos escenarios que utilizan métricas de “cantidad”, modelos de “tipo one to one”, usan datos “simulados” para probar el framework y realizan estudios de “acoplamiento” y “ataques intencionales” respectivamente. Cabe mencionar que los frameworks presentados por cada artículo pueden caer en más de uno de estos escenarios pues cada framework puede utilizar más de un modelo, métrica o realizar más de un estudio. Un total de 15 papers distintos se encuentran dentro de estos 5 escenarios, lo que corresponde a un 26.3% del total de artículos considerados en la revisión.

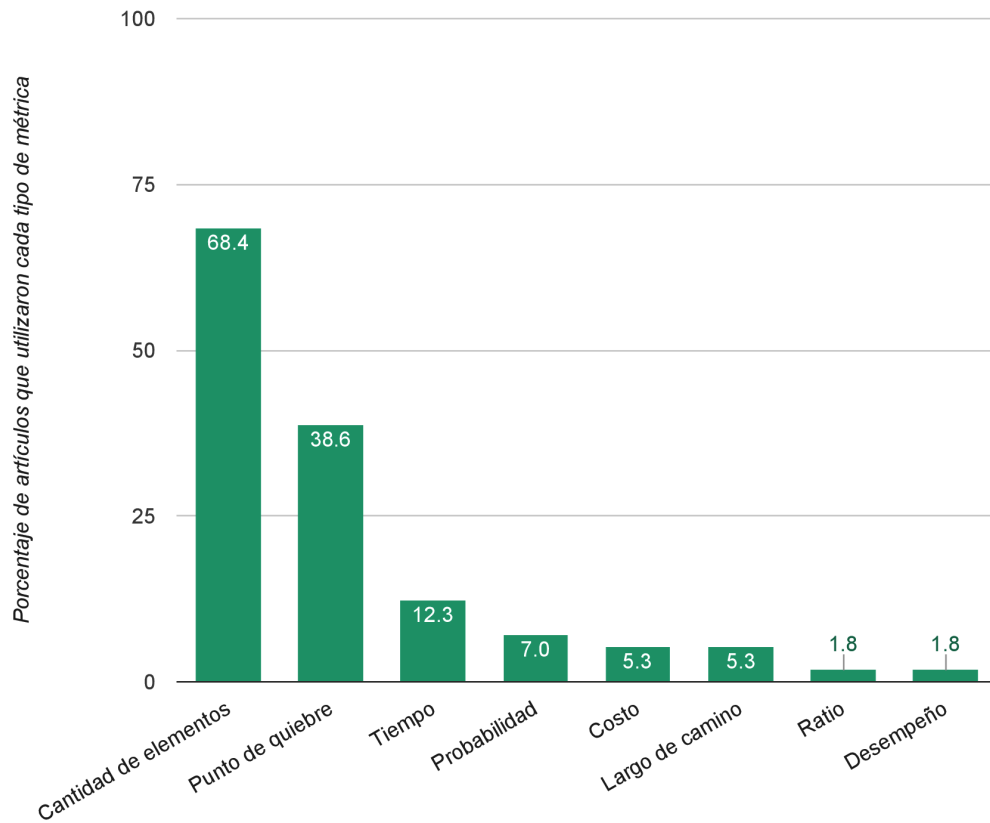


(a) Porcentaje de papers que utilizaron cada modelo.

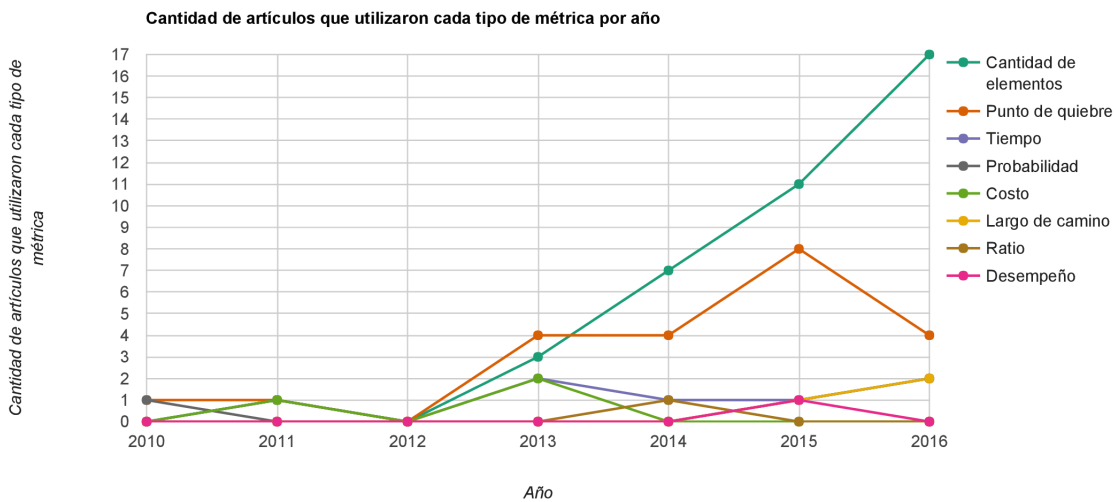


(b) Cantidad de papers por año que utilizaron cada modelo.

Figura 3.1: Resultados por modelos

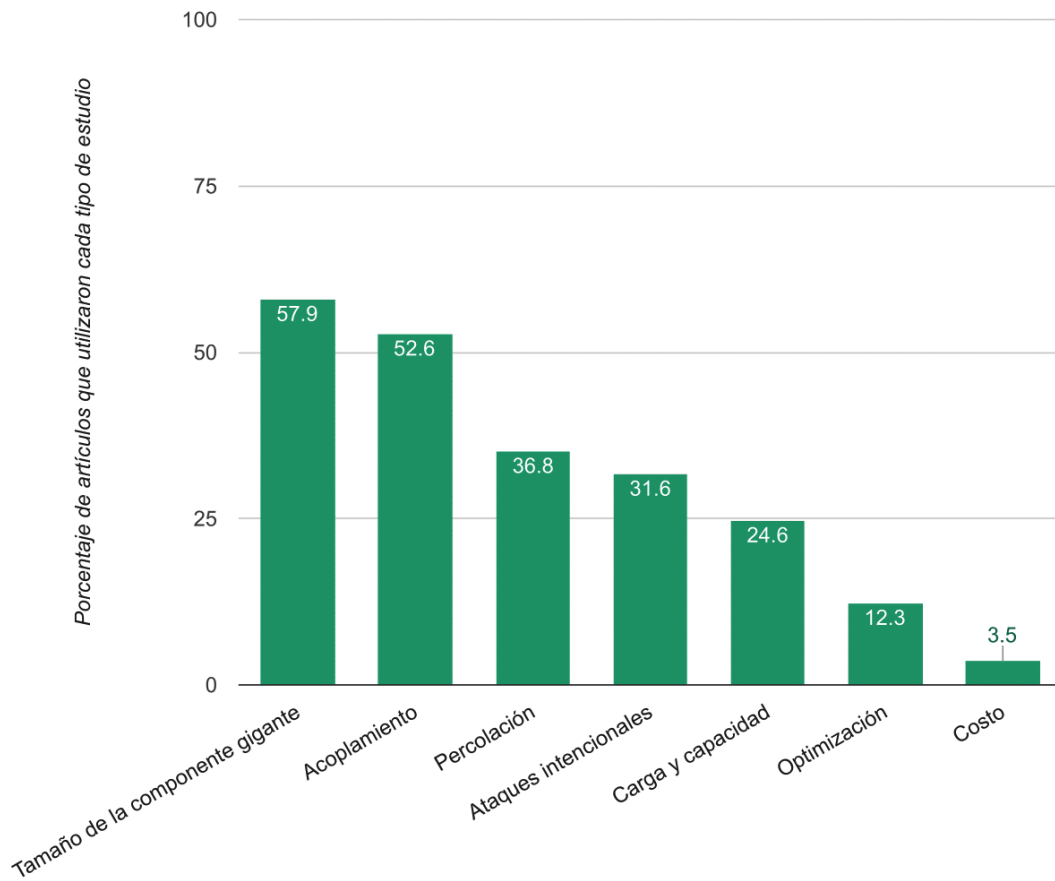


(a) Porcentaje de papers que utilizaron cada métrica.

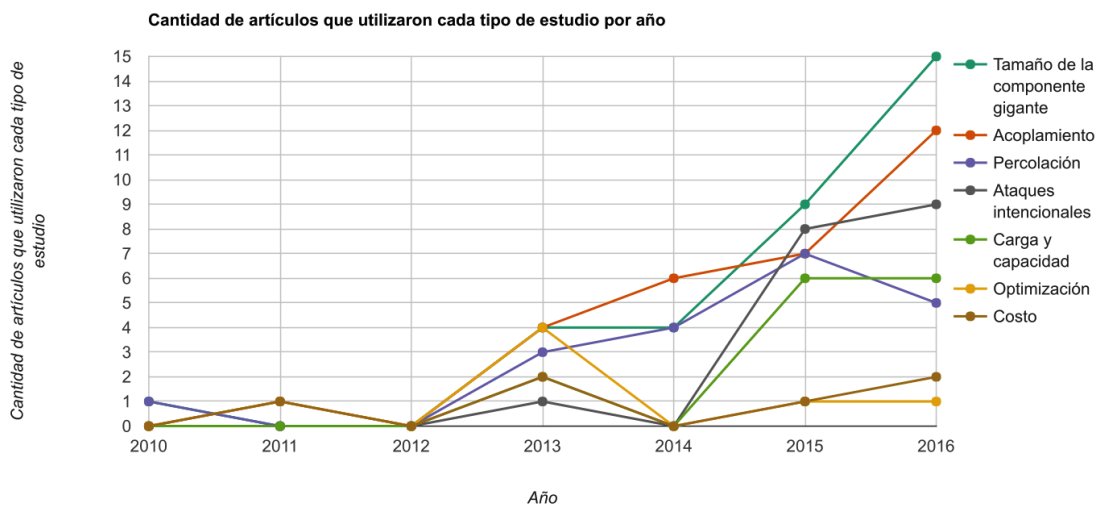


(b) Cantidad de papers por año que utilizaron cada métrica.

Figura 3.2: Resultados por métrica



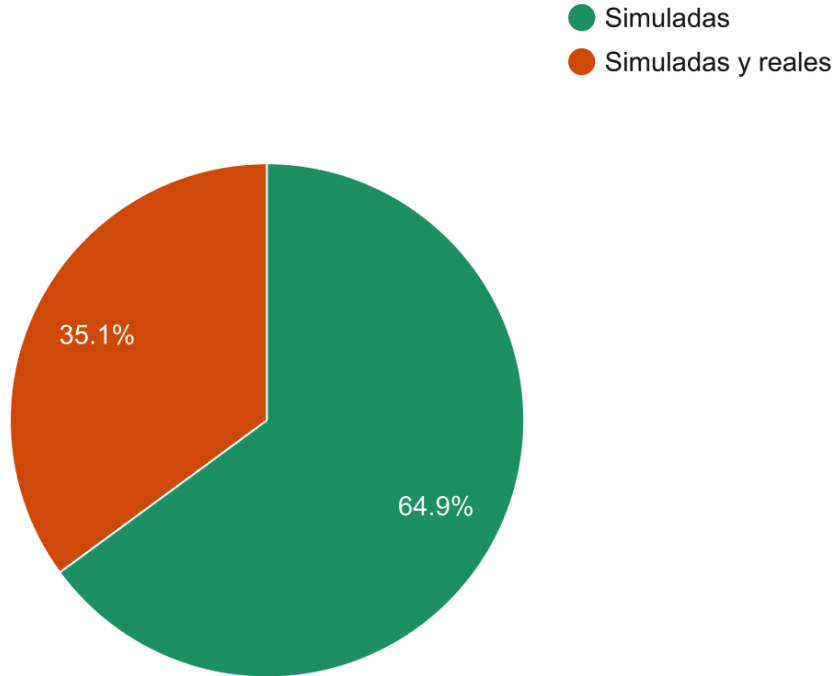
(a) Porcentaje de papers que utilizaron cada estudio.



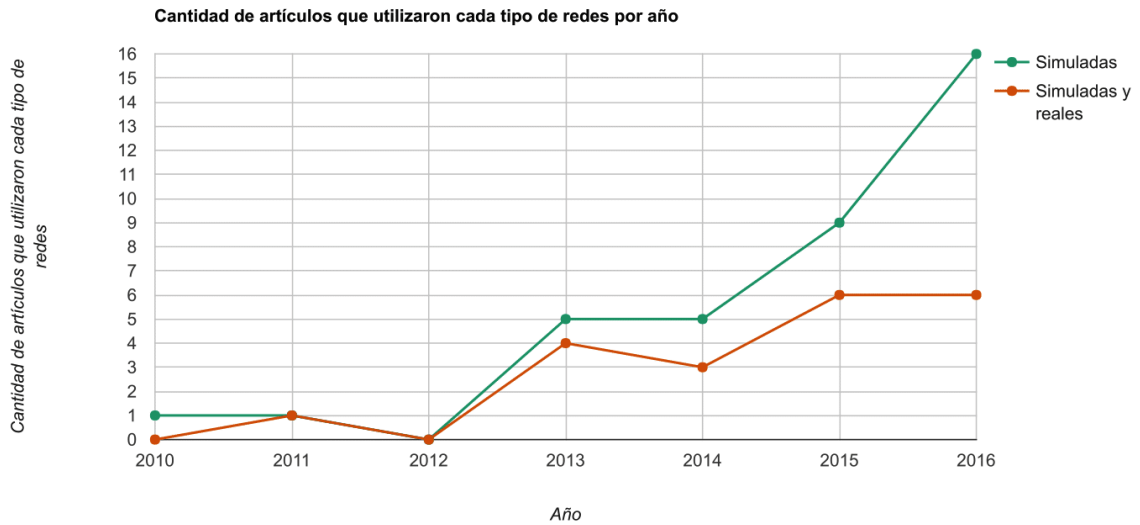
(b) Cantidad de papers por año que utilizaron cada estudio.

Figura 3.3: Resultados por estudios

Porcentaje de artículos que utiliza cada tipo de redes para testear su framework



(a) Porcentaje de papers que utilizaron cada tipo de redes para testear el framework.



(b) Cantidad de papers por año que utilizaron cada tipo de redes para testear el framework.

Figura 3.4: Resultados por tipo de red usada para testear el framework

Capítulo 4

Elección de framework

En este capítulo se presentará la elección del framework en base a los estudios revisados en el capítulo 3. Para ello en la sección 4.1 se va a caracterizar la red de Internet chilena como sistema interdependiente, luego en la sección 4.2 se determinarán criterios de selección y se presentará la selección realizada.

4.1. La red chilena de Internet

La red de Internet chilena es un sistema interdependiente, que en el contexto de este trabajo, se considera compuesto por la red física y la red lógica de Internet. Ambas redes interactúan entre sí para proveer el servicio de comunicaciones a los usuarios finales. A continuación se presentan las principales características de la red física y la red lógica, además de cómo ambas redes interactúan entre sí.

4.1.1. Red física

La red física corresponde a la red que se encarga de transferir y distribuir la información a través de medios físicos como cables, fibras ópticas, routers y antenas. En esta red los routers, servidores y antenas pueden ser vistos como los nodos de la red, mientras que cables, fibras y otras formas de transmisión de información entre nodos, como lo son las ondas electromagnéticas en el caso de las antenas, pueden ser vistos como a los arcos de la red. Dentro de la red física el flujo de información es bidireccional entre nodos, pudiendo cada nodo recibir y enviar información a través de los arcos a los cuales está conectado. Además esta red posee características propias del mundo real en el que se encuentra, como lo son las distancias y la propensión a perder arcos o nodos debido a accidentes y/o catástrofes como terremotos, incendios, tsunamis, etc.

4.1.2. Red lógica

La red lógica corresponde a la red que mapea las rutas de comunicación entre los sistemas autónomos de Internet. Los sistemas autónomos son subredes tal que cada una tiene su propia forma de manejar el ruteo dentro de sí misma. Dentro de la red lógica cada sistema autónomo corresponde a un nodo, mientras que los arcos corresponden a las conexiones entre sistemas autónomos. En esta red el flujo de información entre nodos es bidireccional, pudiendo cada nodo recibir y enviar información a través de los arcos a los cuales está conectado. Cabe destacar que en esta red hay una dependencia importante entre sistemas autónomos generales y sistemas autónomos que tienen acceso al resto del Internet mundial, fuera de Chile. Para poder establecer conexiones de forma exitosa dentro de la red chilena y hacia el mundo un nodo debe poseer algún camino hasta algún nodo que provea servicios de Internet, es decir, a un Internet Service Provider o ISP , y hasta las salidas internacionales. Así en términos del acceso a Internet, un usuario debe ser capaz de conectarse a su ISP para poder acceder al resto de la red y a las salidas internacionales.

4.1.3. Interacciones entre redes

La red física y la red lógica interactúan entre sí generando un sistema interdependiente. Estas interacciones se pueden apreciar en ambos sentidos, es decir, la red física depende de la red lógica y la red lógica de la red física. A continuación se presentan las dependencias entre la red física y la red lógica.

- **Dependencia red física-red lógica:** Si todos los sistemas autónomos alojados en un equipo físico son incapaces de responder debido a alguna falla o ataque cibernético, sin importar que los equipos físicos subyacentes se encuentren en ‘buenas condiciones’, estos no van a ser capaces de responder. Luego se puede considerar que el equipo físico también ha sufrido una falla. Por lo tanto se requiere de al menos un sistema autónomo funcionando en un equipo físico para considerarlo funcional en cuanto a dependencias entre redes se refiere.
- **Dependencia red lógica-red física:** Los sistemas lógicos requieren de equipos físicos para funcionar y comunicarse. Así, si todos los nodos de los que depende un sistema autónomo fallan, dicho sistema autónomo ya no podrá comunicarse en el mundo físico y, por lo tanto, tampoco puede comunicarse dentro de su red, fallando. Si queda algún equipo físico en el que pueda correr este sistema autónomo, entonces se considera que puede seguir funcionando en cuanto a dependencias entre redes se refiere.

4.2. Selección de un framework

El principal interés de este estudio es determinar cuál es el framework más apropiado a utilizar para estudiar qué tan resistente es la red de Internet chilena frente a fallos y catástrofes. En particular en el contexto de este trabajo se optó por considerar que la red resiste bien, es decir, es robusta si los usuarios finales de la red siguen siendo capaces de

acceder a Internet aún en escenarios adversos que dañen la red. Se consideró esta definición de robustez dados los objetivos del proyecto CORFO 15BPE-47225 en el que se enmarca esta tesis. Bajo esta definición, dadas dos redes, decimos que ante un mismo ataque la red que conserva el mayor número de nodos con acceso a Internet es más robusta.

En esta sección se mostrarán el framework seleccionado como opción más apropiada para estudiar la robustez de las redes interdependientes física y lógica del Internet chileno y se mostrarán los criterios de selección utilizados. El framework fue elegido entre los frameworks estudiados durante la revisión sistemática, evaluando al framework como un todo.

4.2.1. Criterios de selección

Considerando que se desea encontrar el framework más apropiado para estudiar la robustez de la red chilena dentro de un conjunto de frameworks preexistentes, se decidió seleccionar aquel framework que se ajuste mejor a los siguientes criterios:

- Modelar el sistema interdependiente de acuerdo al objetivo planteado de mantener la red funcional para el mayor número de usuarios posibles. Se considera que la red es funcional para un usuario si este es capaz de acceder a Internet.
- Medir la robustez del sistema interdependiente de forma que el acceso a Internet de los usuarios juegue un rol importante a la hora de establecer la vulnerabilidad del sistema.

4.2.2. Framework seleccionado

En esta sección primero se presentará el framework elegido junto a sus características generales y luego se presentarán las razones por las que este framework fue elegido dados los criterios de selección establecidos.

Descripción del framework seleccionado

Luego de analizar los artículos estudiados se determinó que el mejor candidato corresponde al framework utilizado por Parandehgheibi et al. [42]. Este trabajo, publicado en 2013, propone un modelo para estudiar una red de suministro eléctrico junto a su red de control. La red eléctrica posee nodos generadores y subestaciones, mientras que la red de control posee centros de control y ruteo. Las subestaciones pueden operar siempre y cuando exista un camino que conecte a la subestación con el generador para recibir poder, y que se conecte a un router para enviar y recibir información. Asimismo, los routers se mantienen operativos si es que existe un camino entre el router y el centro de control para entregar y recibir información, y se encuentre conectado a una subestación para recibir electricidad.

Se especifica además que las dependencias entre redes pueden o no ser dirigidas y no existe una restricción en la cantidad de nodos dependientes que puede tener cada nodo. Así, un nodo falla si es que no tiene a ningún nodo que le provea de información o energía, dependiendo de

si se trata de la red eléctrica o de comunicaciones. En cambio, si dicho nodo tiene al menos un nodo entregándole soporte en la otra red y conexión con su proveedor este puede seguir funcionando. Este modelo corresponde a un modelo de tipo “red eléctrica acoplada”. Sobre este modelo se utiliza como métrica de robustez el ‘número mínimo de nodos a remover para causar fallo total’, llamada Node-MTFR (Node Minimum Total Failure Removal), la cual corresponde a una métrica de “punto de quiebre”. Este es un trabajo que únicamente realiza estudios de ‘optimización’, manteniendo su foco en la métrica Node-MTFR para medir la robustez.

Justificación de la elección

Este framework fue elegido dentro del conjunto estudiado por presentar elementos que lo distinguen de los demás y que, por sobretodo, lo acercan a lo que se desea estudiar de la red chilena.

Primero, este framework presenta un modelo que, si bien su principal objetivo es modelar una red eléctrica, presenta un enfoque de proveedor-consumidor al establecer que los nodos deben encontrarse conectados ya sea al generador (en el caso de la red eléctrica) o al centro de control (en el caso de la red de comunicaciones). Este comportamiento, al traspasarse al caso de la red chilena, se puede interpretar como que los usuarios necesitan mantenerse conectados a nodos proveedores mencionados previamente para conservar su estatus de “conectados a Internet” tanto nacional como internacional, que es precisamente lo que se plantea en el primer criterio de selección.

Además, el caso del modelo con interacciones bidireccionales se ajusta bien a la caracterización que se le ha dado al sistema interdependiente del Internet chileno en este trabajo. Segundo, la métrica utilizada corresponde a una métrica de “punto de quiebre” que mide el número de nodos que se debe remover para causar una falla total sobre el sistema. Dado que el modelo ya permite capturar que los usuarios deben mantenerse conectados a Internet, para la métrica utilizada en este framework, la cual mide el mínimo número de nodos a remover para causar un fallo total, se tiene de forma directa que el hecho de que los usuarios deben tener acceso a la red juega un rol importante en la medición de robustez. Por lo tanto este framework cubre los dos criterios planteados en la sección 4.2.1.

Para capturar el primer punto de los criterios de selección un framework debe ser capaz de capturar el hecho de que un usuario tenga acceso a Internet, es decir que tenga acceso a un proveedor de Internet. La mayoría de los frameworks estudiados no presenta un comportamiento específico de proveedor-consumidor donde el proveedor esté bien definido, es decir, que corresponda a uno o más nodos especiales dentro de la red, por lo que fueron descartados. Sin embargo, un caso que cabe destacar es el del framework expuesto en el trabajo de Matsui et al. [38] el cual sí cumple apropiadamente los criterios de selección, pero que fue descartado para priorizar el framework utilizado en [42] debido a que [38] presenta un modelo dentro del tipo “red eléctrica acoplada” de mayor especificidad que el presentado en [42]. En [38] se utiliza el acoplamiento de la red eléctrica con su red de comunicaciones, donde los nodos de la red de comunicaciones corresponden a routers o a nodos esclavos y no existe un nodo proveedor como es el nodo de centro de control mencionado en [42], sino que se asume que

la red tiene una estructura de árbol tal que la raíz cumple dicho rol. Cada tipo de nodo realiza una función diferente sobre la red eléctrica lo cual dificulta el uso directo del modelo planteado sobre la red chilena. De esta manera se optó por privilegiar el framework usado en [42] el cual puede aplicarse sobre la red chilena sin mayores modificaciones.

4.2.3. Ejemplo de fallo en cascada

El comportamiento del modelo presentado puede apreciarse en la figura 4.1, las imágenes de esta figura fueron extraídas directamente del trabajo de Parandehgheibi et al. [42], donde se muestra cómo se comportan las redes interdependientes si un nodo sufre una falla. Las redes que se muestran en la figura 4.1 poseen interacciones unidireccionales. En este caso los arcos azules entre redes representan arcos de soporte de la red de control sobre la red eléctrica y los arcos rojos entre redes representan los arcos de soporte de la red eléctrica sobre la red de control, de esta forma el nodo S_3 recibe soporte de R_3 y le entrega soporte a R_2 , S_1 le entrega soporte a R_1 , R_1 le entrega soporte a S_2 , etc. (ver figura 4.1a). Inicialmente se tiene la red eléctrica (Power Grid) con 4 nodos subestaciones (S_1, S_2, S_3 y S_4) más 1 nodo generador (G) y la red de control (CCN) con 3 nodos routers (R_1, R_2 y R_3) más 1 nodo centro de control (C). En el paso 1 se tiene que S_4 falla. Debido a esta falla, en el paso 2, R_2 y R_3 pierden un arco de soporte cada uno y, en particular, R_3 pierde todos los sus arcos de soporte de la red eléctrica por lo que falla. Debido a esta falla S_1 y S_3 pierden su único arco de soporte de la red de control y R_2 pierde su capacidad para comunicarse con el centro de control, de esta forma en el paso 3 S_1, S_3 y R_2 fallan. Finalmente, como se puede ver en el paso 4, debido a la falla de S_1 , R_1 pierde su arco de soporte de la red eléctrica por lo que falla y S_2 pierde comunicación con el generador y también falla, con lo cual la cascada finaliza con un fallo total del sistema.

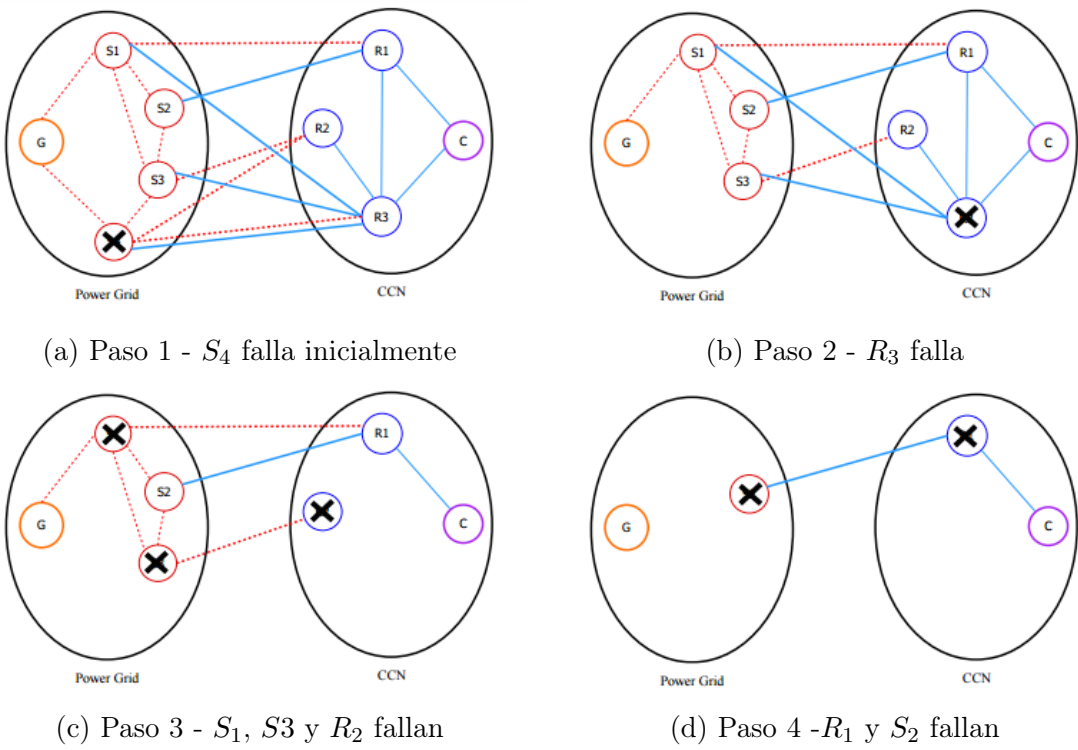


Figura 4.1: Ejemplo de fallo en cascada en una red interdependiente con dependencias unidireccionales descritas en el trabajo de Parandehgheibi et al. (Ver [42])

Capítulo 5

Propuesta de implementación para redes interdependientes

A continuación se explicará cómo se llevó a cabo la implementación del framework y cómo generar a partir de datos reales el sistema de redes interdependientes requerido para el framework. En la sección 5.1 se presentará cómo construir a partir de datos reales un sistema de redes interdependientes como el presentado en el framework elegido en el capítulo anterior (ver [42]). Mientras que en la sección 5.2 se presentará la implementación del framework en código en el contexto del proyecto CORFO 15BPE-47225. Finalmente en la sección 5.3 se discutirá brevemente cómo se testeó el código implementado.

5.1. Mapeo de datos

En la presente sección se mostrará por cuál modelo, de los ofrecidos por el framework elegido, se optó para modelar el problema de la red chilena y cómo se puede construir la red física, la red lógica y las interdependencias entre ambas a partir de datos reales.

5.1.1. Elección de modelo

El framework elegido en la sección anterior presenta dos modelos donde las redes que interactúan poseen nodos proveedores y nodos comunes los cuales requieren conexión con algún proveedor para mantenerse funcionales. Estos modelos se distinguen según el tipo de interdependencias entre redes que utilizan: unidireccional o bidireccional. En el primer caso un nodo que le entrega soporte a otro no necesariamente depende del nodo al que le da soporte, sino que puede depender de algún otro nodo. En el segundo caso si un nodo le da soporte a otro entonces necesariamente depende de dicho nodo. Además, un mismo nodo puede tener dependencias a varios nodos o entregarle soporte a más de un nodo. De esta forma un nodo permanece funcional si tiene al menos un nodo que le entregue soporte y si tiene acceso a al menos un proveedor.

En el contexto del presente trabajo se optó por interacciones bidireccionales entre redes pues tal como se explicó en la sección 4.1 un nodo en la red lógica falla si pierde acceso a su proveedor o si todos los nodos físicos en los que se aloja falla. El caso de un nodo en la red física es análogo. Por lo tanto la relación al establecerse una conexión entre un nodo de la red física y un nodo de la red lógica es bidireccional.

5.1.2. Construcción de la red física

Para construir la red física a partir de datos reales se debe considerar que hay medios de comunicación generales, que no procesan mayormente la señal, como lo son los cables o las señales de antena, medios de comunicación particulares que pueden pertenecer a un sistema autónomo como routers o antenas [32] y puntos de almacenamiento como lo son servidores o las instalaciones que los alojan. Para construir la red física, según los datos reales que se manejen, los puntos de almacenamiento se deben considerar como nodos de la red, mientras que los medios de comunicación generales deben considerarse como arcos. Los medios de comunicación particulares, dado que la construcción de interdependencias ocurre entre los nodos de las redes participantes, deben considerarse como nodos. Finalmente, se deben considerar como nodos proveedores aquellos nodos que formen parte de los ISPs de la red y las salidas internacionales.

5.1.3. Construcción de la red lógica

La red lógica corresponde a la red compuesta por los distintos sistemas autónomos y el ruteo entre ellos. En este caso los datos reales contienen a los sistemas autónomos y las relaciones de vecindad entre ellos, de esta forma la red se construye tomando como nodos a los sistemas autónomos, conectándolos por arcos según si dos sistemas autónomos son vecinos o no. Los nodos proveedores de esta red corresponden a los sistemas autónomos de los ISPs y las salidas internacionales.

5.1.4. Mapeo de interacciones entre redes

En el caso del mapeo de interacciones entre las redes física y lógica, se deben buscar para cada nodo en la red lógica aquellos elementos en la red física que lo alojan o forman parte de él (routers, servidores, etc.) y establecer una conexión bidireccional entre ellos. Dado cómo se construye la red física estos elementos corresponden a nodos de la red física. Este proceso debe continuar hasta que todos los nodos de la red lógica se encuentren acoplados. Si nodos de la red física no se acoplan a ningún nodo de la red lógica entonces se tiene que estos son nodos de comunicación para redistribución de información. Estos nodos pueden mantenerse en funcionamiento siempre y cuando se encuentren conectados a través de algún camino con el proveedor.

5.2. Implementación del framework

En el contexto del proyecto CORFO 15BPE-47225 “Estudio y recomendaciones sobre la resiliencia de la infraestructura del Internet chileno” se implementó una clase compatible con el proyecto existente que permite construir y manejar redes interdependientes según el framework elegido en el capítulo anterior. Para la implementación de esta clase se escogió utilizar la librería `igraph` [3] pues presenta una amplia colección de clases y métodos para el manejo y análisis de grafos. Esta librería puede ser utilizada en los lenguajes de programación R, python, C y C++.

El lenguaje de programación elegido para la programación del framework fue python. Este lenguaje fue elegido por ser el lenguaje de programación que utiliza el proyecto de CORFO 15BPE-47225 en la implementación de su aplicación web. Además de ser un lenguaje el cual la tesis conoce bien, disminuyendo la curva de aprendizaje y por lo tanto el tiempo total invertido en la programación de la clase.

Tal como se ha mencionado, la implementación de los elementos necesarios para la utilización del framework elegido se concentra en una única clase la cual fue bautizada como `interdependentGraph`. Esta clase contiene constructores, métodos para obtener el valor de métricas sobre la red y métodos para modelar el comportamiento de las redes según el framework elegido cuando esta es atacada. La implementación de esta clase se encuentra disponible en Github¹.

5.2.1. Representación de las redes interdependientes

Para la representación de las redes interdependientes se utilizaron 3 redes distintas, donde cada una corresponde a un objeto de tipo `Graph` en `igraph`. Como se puede ver en el esquema 5.1 una de las redes se encarga de representar la red lógica, otra de representar la red física y la última se encarga de representar la red de interacciones entre ambas redes. En el caso de la red de interacciones tenemos que esta contiene únicamente a los nodos acoplados de ambas redes y las interacciones entre redes (y no dentro de ellas), por lo que forma un grafo bipartito. Se optó por construir así el sistema interdependiente dado el framework elegido, el cual calcula la métrica Node-MTFR tomando únicamente a la red de interdependencias. Al momento de crear un objeto de tipo `interdependentGraph` se espera que cada nodo en cada una de las redes involucradas posea un identificador único para ambas redes, es decir que un identificador en la red física no debe existir como identificador en la red lógica.

Un objeto del tipo `interdependentGraph` se puede crear a partir de archivos separados por coma o `.CSV` o bien a partir de grafos previamente creados en `igraph`. En caso de crear las redes a partir de archivos `.CSV` se espera que estos contengan la relación entre nodos listando pares de nodos separados por coma, donde se crea un nodo por cada nombre distinto utilizado dentro del archivo y por cada par separado por comas se establece un arco. En el caso de crear la red a partir de objetos de tipo `Graph` estos deben contener identificadores ya establecidos. En ambos casos se debe especificar una lista de nodos para cada red que correspondan a los

¹https://github.com/ibachman/interdependent_network_library

nodos proveedores.

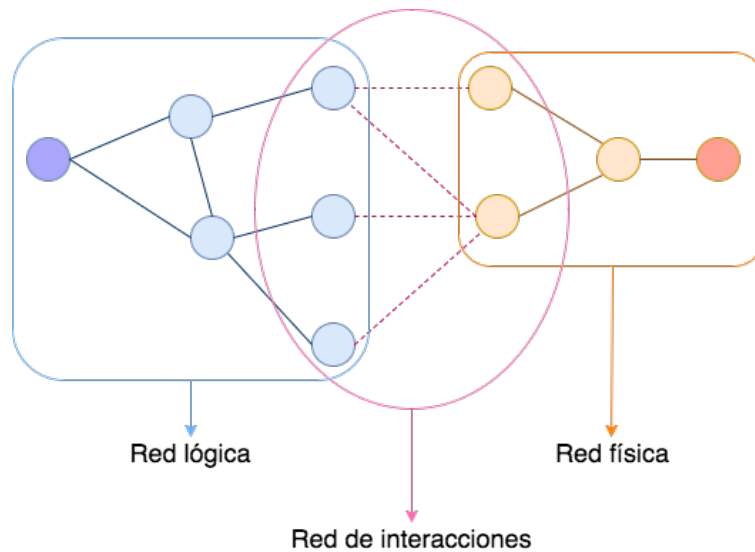


Figura 5.1: Esquema de representación de redes en el código.

5.2.2. Implementación de fallos en cascada

El método `attack_nodes` contiene la implementación de falla en cascada en caso de que uno o más nodos dejen de funcionar. Este método recibe una lista de nodos identificados según su nombre único. El método `attack_nodes` procede a nivel algorítmico de la siguiente forma:

1. Verificar que exista al menos un nodo en la lista de nodos a eliminar. Si no hay, se termina el proceso pues la red ha alcanzado un estado estable.
2. Eliminar los nodos en las 3 redes que conforman el sistema interdependiente. Vaciar la lista de nodos a eliminar.
3. Eliminar los nodos tal que no tienen ningún camino que los conecte con algún proveedor dentro de su red en las 3 redes que conforman el sistema.
4. Determinar qué nodos, dentro del grafo de interacciones, han perdido todas sus conexiones y añadirlos a la lista de nodos por eliminar.
5. Volver al paso 1.

5.2.3. Implementación de métricas

En el contexto del proyecto CORFO 15BPE-47225, al que pertenece este trabajo, fue agregada otra métrica además de la métrica presentada por el framework elegido para permitir un mejor análisis de las redes ampliando la visión de las mismas. A continuación se explican las implementaciones de ambas métricas.

La métrica utilizada por el framework elegido [42] corresponde a “**Node-MTFR**”, la cual determina el número mínimo de nodos que se debe remover para causar un fallo total. Dentro de [42] esta métrica es utilizada únicamente en la red de interdependencias con el objetivo de medir el daño que inducen las interdependencias en las redes. Notemos que en el caso de la red chilena al dejar de funcionar la red de interdependencias, dado que cada nodo en la red lógica está acoplado a alguno en la red física, el sistema completo deja de funcionar. De esta manera se implementó el método `node_mtf`, el cual calcula el número mínimo de nodos que se debe remover en la red de interdependencias para que esta deje de funcionar.

En [42] se demuestra que, en el caso de dependencias bidireccionales entre redes, el valor de la métrica Node-MTFR es igual al número de nodos que conforman el mínimo cubrimiento de vértices del grafo de interacciones entre redes. Para encontrar el número de nodos que conforman el mínimo cubrimiento de vértices en el grafo de interdependencias se utiliza el método provisto por `igraph maximum_bipartite_matching()`, el cual determina el matching máximo en un grafo bipartito tal que cada nodo pertenezca a un único arco del matching, es decir, entrega un arreglo con los nodos que corresponden al matching máximo para el grafo. Esto pues según el teorema de König para grafos bipartitos [31], el número mínimo de vértices para realizar un cubrimiento de arcos es igual al número de arcos que resuelven el problema de matching máximo (ver [50]). Con todo lo anterior el método `node_mtf` simplemente retorna el largo del arreglo de nodos que entrega el método `maximum_bipartite_matching()` de `igraph`.

En la figura 5.2 se muestra un ejemplo de sistema interdependiente artificial compuesto por una red lógica y una red física. Los arcos punteados corresponden a las conexiones entre redes. Para estas redes el valor de Node-MTFR es igual a 2. El par A1-A2 corresponde al par de nodos que satisface el mínimo cubrimiento de vértices y por lo tanto al removerlos se pierden todas las interdependencias entre redes.

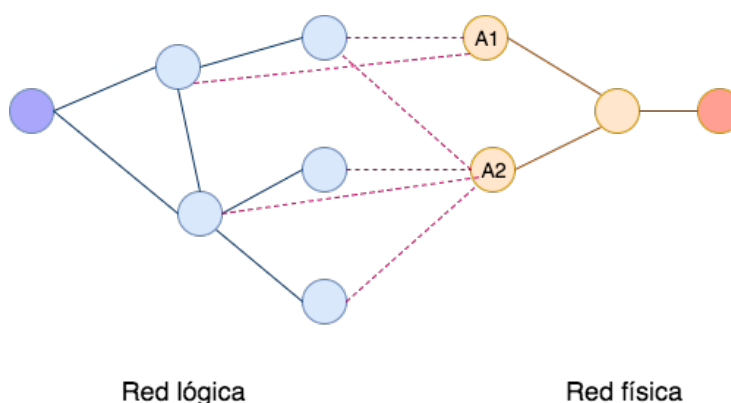


Figura 5.2: Nodos que satisfacen Node-MTFR en el sistema. Si se remueve el par A1-A2 las redes pierden todas sus interdependencias.

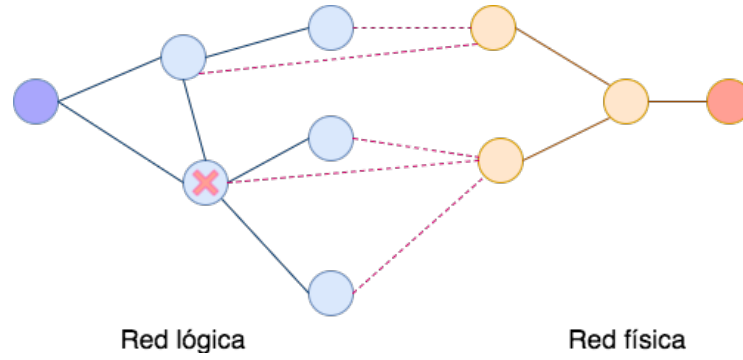
Además de la métrica Node-MTFR, se implementó la métrica utilizada por [38] la cual, en el contexto de una red eléctrica acoplada a su red de control, mide el **ratio de nodos funcionales en la red eléctrica** luego de un ataque respecto a la red original. Se escogió esta métrica por sobre otras por ser la métrica utilizada en [38], trabajo que presenta el segundo framework más apropiado para estudiar las redes física y lógica del Internet chileno

(ver sección 4.2.2). Esta métrica fue adaptada para propósitos del trabajo aquí presentado de acuerdo al objetivo de medir la conectividad de la red percibida por los usuarios. De esta forma, en la implementación realizada en la clase `interdependentGraph`, esta métrica mide el ratio de nodos que permanecen funcionales en la red lógica luego de un ataque en el sistema interdependiente, ya que es en esta red en donde se puede medir el impacto sobre los usuarios finales. En la figura 5.3 se puede ver qué nodos se consideran funcionales luego de un fallo en cascada en un sistema interdependiente artificial. El método que implementa esta métrica es `get_ratio_of_funtional_nodes_in_AS_network`. Este método toma la cantidad original de nodos en la red lógica (cantidad que es almacenada al construir el sistema interdependiente) y la contrasta con la cantidad de nodos funcionales de la red en su estado actual. Para observar cambios en el valor de esta métrica es necesario haber utilizado previamente el método `attack_nodes` sobre el sistema interdependiente creado, de lo contrario su valor será igual a 1.

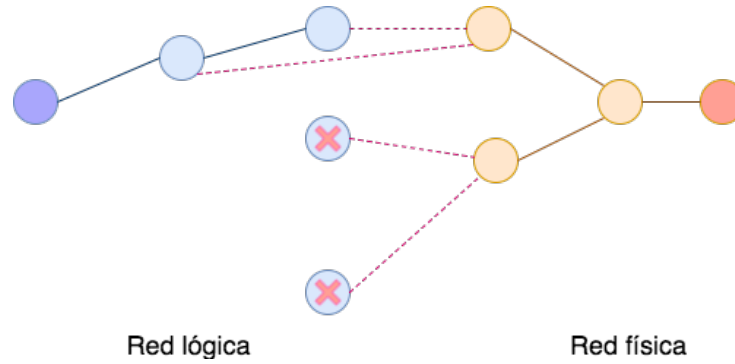
5.3. Pruebas sobre la implementación

La implementación presentada en la sección 5.2 fue testeada utilizando datos artificiales de pequeña escala (menos de 100 nodos) con el objetivo de asegurar que el código estuviese funcional y entregase los resultados esperados frente a diferentes fallos. Este código no fue probado utilizando datos reales sobre la red chilena pues estos están siendo recopilados, por lo que los datos completos no se encuentran disponibles actualmente. Sin embargo, se espera tener disponibles los datos sobre la red física y la red lógica del Internet chileno además de sus interacciones hacia fines del presente año 2017.

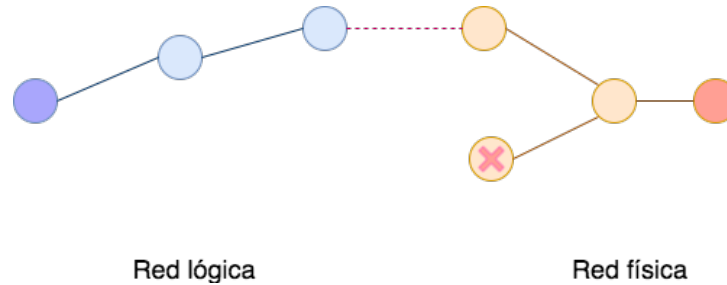
Una vez se cuenten con los datos reales sobre el Internet chileno, estos se podrán mapear utilizando las guías provistas en la sección 5.1 y evaluar a través del código presentado en la sección 5.2. De esta manera se podrá evaluar la robustez que tiene actualmente el Internet chileno y el efecto que puede tener el realizar distintas modificaciones sobre la red.



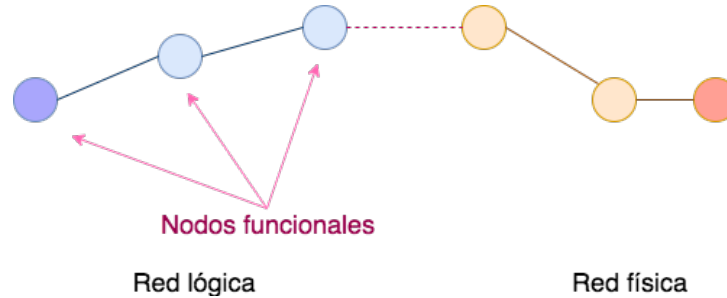
(a) Paso 1 - Se elimina un nodo para iniciar el fallo en cascada.



(b) Paso 2 - Nodos en la red lógica fallan por falta de acceso al proveedor.



(c) Paso 3 - Nodo en la red física falla por falta de soporte.



(d) Paso 4 - Las redes alcanzan un estado estable. Ratio de nodos funcionales: 0.5

Figura 5.3: Ejemplo de nodos considerados funcionales para la métrica “ratio de nodos funcionales”.

Conclusión

Para la presente tesis, de acuerdo a los objetivos planteados, se llevó a cabo una revisión sistemática. De esta revisión se desprende que la utilización de frameworks para estudiar la robustez de redes interdependientes corresponde a un área relativamente joven que se ha ido abriendo paso en los últimos años (2010 -2016). Este tipo de estudios ha ganado fuerza en particular en áreas mayormente relacionadas con redes interdependientes con interacciones simples cuya intención no es representar a la perfección el comportamiento de redes interdependientes reales si no más bien ofrecer un framework amplio y versátil. Esto se puede observar en la popularidad de los modelos “tipo one-to-one”, las métricas de “cantidad de elementos” y los estudios de “tamaño de la componente gigante” y “acoplamiento”, los cuales corresponden a modelos, métricas y estudios que no presentan una especificidad demasiado alta permitiendo su aplicación sobre muchos casos. Sin embargo, esto también implica que la utilización de este tipo de frameworks no necesariamente va a entregar resultados que se ajusten apropiadamente con lo que se observaría en escenarios reales los cuales tienden a ser mucho más específicos.

Para el caso particular del Internet chileno, ha sido posible cumplir con el objetivo impuesto en esta tesis de establecer criterios de selección y encontrar, de acuerdo a estos criterios, un framework capaz de representar el comportamiento deseado de proveer Internet a los usuarios finales de la red. Esto ha sido posible a pesar de que el framework original plantea su uso para un par de redes bastante distinto a las redes física y lógica del Internet chileno como lo son la red eléctrica con su red de comunicaciones. Este framework puede ser mejorado haciendo que tome en cuenta características específicas de la red chilena como, por ejemplo, la distancia, ubicación y propensión a catástrofes según la ubicación de los arcos y nodos en la red física. Esto último se puede lograr añadiendo largo a los arcos, probabilidades de fallo a los nodos según su ubicación y utilizando métricas que consideren estos factores. Otra forma de mejorar el framework es añadir interacciones que puedan tener las redes física y lógica con otras redes a su alrededor para obtener una visión más completa del comportamiento de la red frente a diversas eventualidades. Algunos ejemplos de redes que pueden afectar tanto el comportamiento como la construcción de la red de Internet son la red de caminos y la red eléctrica, dónde la primera entrega guías de los lugares por donde es más fácil y menos costoso añadir fibras o cables, mientras el segundo provee la energía que distintos nodos de la red física requieren para funcionar.

En este trabajo también se estableció una metodología para mapear datos reales de las redes que componen el Internet chileno a sistemas de redes interdependientes y se generó una implementación en código del framework elegido para estudiar la robustez del Internet

chileno como sistema interdependiente, de acuerdo a los objetivos planteados originalmente. Como continuación del trabajo aquí presentado queda incorporar la metodología de construcción de sistemas interdependientes a partir de datos reales y el código desarrollado dentro del proyecto CORFO “Estudio y recomendaciones sobre la resiliencia de la infraestructura del Internet chileno” para aplicarlo sobre los datos del Internet chileno y así generar un diagnóstico de la situación actual de las redes participantes. Estos datos están siendo recopilados y se encuentran incompletos, por lo que no pudieron ser usados en el presente trabajo. Se espera que estos datos se encuentren completos y disponibles para ser estudiados utilizando el framework implementado a fines del presente año. El uso del framework implementado en conjunto con el proyecto permitirá además generar simulaciones sobre las redes para evaluar cómo cambios en la estructura de estas redes y sus dependencias pueden afectar la robustez del Internet, lo que a su vez permitirá evaluar cambios que se puedan hacer para mejorar la estructura de la red de Internet chilena.

Además como trabajo futuro queda mejorar el framework elegido para que se adapte tanto como sea posible al contexto chileno. Como primer paso para mejorar el framework, tal como se mencionó previamente, se deben incorporar detalles sobre las redes física y lógica que el framework elegido haya sido incapaz de capturar. Una vez hecho esto se deben estudiar en profundidad las interacciones de la red física y la red lógica con otras redes. Las redes que interactúen con la red física y la red lógica se deben acoplar en el framework de forma que sus características sean consideradas de la manera más completa posible. Un framework mejorado con estas características podría entregar una visión mucho más detallada y precisa sobre la red chilena de Internet.

Capítulo 6

Bibliografía

- [1] Autonomous system. <https://tools.ietf.org/html/rfc1930>. Accessed: 21-03-2017.
- [2] Border gateway protocol. <https://tools.ietf.org/html/rfc4271>. Accessed: 02-08-2016.
- [3] Library: igraph. <http://igraph.org/redirect.html>. Accessed: 08-02-2017.
- [4] Model template view:. <https://docs.djangoproject.com/en/1.10/faq/general/>. Accessed: 22-03-2017.
- [5] ¿por qué las redes sociales fueron claves durante el terremoto de chile? <http://www.elmundo.es/internacional/2015/09/18/55fbeee946163f81488b457f.html>. Accessed: 02-08-2016.
- [6] Charles O Adler and Cihan H Dagli. Study of the use of a genetic algorithm to improve networked system-of-systems resilience. *Procedia Computer Science*, 36:49–56, 2014.
- [7] Abdulaziz Alashaikh, David Tipper, and Teresa Gomes. Supporting differentiated resilience classes in multilayer networks. In *2016 12th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, pages 31–38. IEEE, 2016.
- [8] Réka Albert, István Albert, and Gary L Nakarado. Structural vulnerability of the north american power grid. *Physical review E*, 69(2):025103, 2004.
- [9] Amir Bashan, Yehiel Berezin, Sergey V Buldyrev, and Shlomo Havlin. The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks. *Nature Physics*, 9(10):667–672, 2013.
- [10] Yehiel Berezin, Amir Bashan, Michael M Danziger, Daqing Li, and Shlomo Havlin. Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies. *Scientific reports*, 5, 2015.
- [11] Sergey V Buldyrev, Roni Parshani, Gerald Paul, H Eugene Stanley, and Shlomo Havlin.

- Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291):1025–1028, 2010.
- [12] Wei Koong Chai, Vaios Kyritsis, K Katsaros, and George Pavlou. Resilience of interdependent communication and power distribution networks against cascading failures. *15th IFIP Networking, Vienna, Austria*, 2016.
- [13] Srinjoy Chattopadhyay and Huaiyu Dai. Towards optimal link patterns for robustness of interdependent networks against cascading failures. In *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [14] Zhen Chen, Wen-Bo Du, Xian-Bin Cao, and Xing-Lian Zhou. Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack. *Chaos, Solitons & Fractals*, 80:7–12, 2015.
- [15] Zunshui Cheng and Jinde Cao. Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 430:193–200, 2015.
- [16] Michael M Danziger, Amir Bashan, Yehiel Berezin, and Shlomo Havlin. Interdependent spatially embedded networks: dynamics at percolation threshold. In *Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS), 2013 International Conference on*, pages 619–625. IEEE, 2013.
- [17] MA Di Muro, CE La Rocca, HE Stanley, S Havlin, and LA Braunstein. Recovery of interdependent networks. *Scientific reports*, 6, 2016.
- [18] Gaogao Dong, Ruijin Du, Lixin Tian, and Runran Liu. Robustness of network of networks with interdependent and interconnected links. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 424:11–18, 2015.
- [19] Gaogao Dong, Lixin Tian, Ruijin Du, Min Fu, and H Eugene Stanley. Analysis of percolation behaviors of clustered networks with partial support–dependence relations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 394:370–378, 2014.
- [20] Ruijin Du, Gaogao Dong, Lixin Tian, and Runran Liu. Targeted attack on networks coupled by connectivity and dependency links. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 450:687–699, 2016.
- [21] Alexander A Ganin, Emanuele Massaro, Alexander Gutfraind, Nicolas Steen, Jeffrey M Keisler, Alexander Kott, Rami Mangoubi, and Igor Linkov. Operational resilience: concepts, design and analysis. *Scientific reports*, 6, 2016.
- [22] Dong Gaogao, Du Ruijin, Hao Huifang, and Tian Lixin. Shell attack on interdependent networks. In *Control Conference (CCC), 2016 35th Chinese*, pages 1198–1201. TCCT, 2016.
- [23] Maoguo Gong, Lijia Ma, Qing Cai, and Licheng Jiao. Enhancing robustness of coupled networks under targeted recoveries. *Scientific reports*, 5, 2015.

- [24] Yuqi Han, Zhi Li, Chuangxin Guo, and Yuezhong Tang. Improved percolation theory incorporating power flow analysis to model cascading failures in cyber-physical power system. In *Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [25] Sheng Hong, Baoqing Wang, and Jianghui Wang. Cascading failure propagation in interconnected networks with tunable load redistribution strategy. In *Prognostics and System Health Management Conference (PHM), 2015*, pages 1–7. IEEE, 2015.
- [26] Zhen Huang, Cheng Wang, Amiya Nayak, and Ivan Stojmenovic. Small cluster in cyber physical systems: Network topology, interdependence and cascading failures. *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, 26(8):2340–2351, 2015.
- [27] Zhen Huang, Cheng Wang, Tieying Zhu, and Amiya Nayak. Cascading failures in smart grid: Joint effect of load propagation and interdependence. *Access, IEEE*, 3:2520–2530, 2015.
- [28] Xingpei Ji, Bo Wang, Dichen Liu, Guo Chen, Fei Tang, Daqian Wei, and Lian Tu. Improving interdependent networks robustness by adding connectivity links. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 444:9–19, 2016.
- [29] J Jiang, W Li, and X Cai. The effect of interdependence on the percolation of interdependent networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 410:573–581, 2014.
- [30] Barbara Kitchenham. Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, 33(2004):1–26, 2004.
- [31] Denés Konig. Gráfok és mátrixok. *matematikai és fizikai lapok*, 38: 116–119, 1931.
- [32] Anukool Lakhina, John W Byers, Mark Crovella, and Ibrahim Matta. On the geographic location of internet resources. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21(6):934–948, 2003.
- [33] Xin Li, Haotian Wu, Caterina Scoglio, and Don Gruenbacher. Robust allocation of weighted dependency links in cyber–physical networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 433:316–327, 2015.
- [34] Zhang Limiao, Li Daqing, Qin Pengju, Fu Bowen, Jiang Yinan, Enrico Zio, and Kang Rui. Reliability analysis of interdependent lattices. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 452:120–125, 2016.
- [35] Lijun Liu, Yongfeng Yin, Zenghu Zhang, and Yashwant K Malaiya. Redundant design in interdependent networks. *PloS one*, 11(10):e0164777, 2016.
- [36] Run-Ran Liu, Ming Li, and Chun-Xiao Jia. Cascading failures in coupled networks: The critical role of node-coupling strength across networks. *Scientific Reports*, 6, 2016.
- [37] Run-Ran Liu, Ming Li, Chun-Xiao Jia, and Bing-Hong Wang. Cascading failures in

- coupled networks with both inner-dependency and inter-dependency links. *Scientific reports*, 6, 2016.
- [38] Yuki Matsui, Hideharu Kojima, and Tatsuhiro Tsuchiya. Modeling the interaction of power line and scada networks. In *2014 IEEE 15th International Symposium on High-Assurance Systems Engineering*, pages 261–262. IEEE, 2014.
- [39] Duy T Nguyen, Yilin Shen, and My T Thai. Detecting critical nodes in interdependent power networks for vulnerability assessment. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 4(1):151–159, 2013.
- [40] TM Ouboter, DTH Worm, RE Kooij, and Huijuan Wang. Design of robust dependent networks against flow-based cascading failures. In *Reliable Networks Design and Modeling (RNDM), 2014 6th International Workshop on*, pages 54–60. IEEE, 2014.
- [41] Min Ouyang and Zhenghua Wang. Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 141:74–82, 2015.
- [42] Marzieh Parandehgheibi and Eytan Modiano. Robustness of interdependent networks: The case of communication networks and the power grid. In *Global Communications Conference (GLOBECOM), 2013 IEEE*, pages 2164–2169. IEEE, 2013.
- [43] Srinath Pinnaka, Rajgopal Yarlaga, and Egemen K Cetinkaya. Modelling robustness of critical infrastructure networks. In *Design of Reliable Communication Networks (DRCN), 2015 11th International Conference on the*, pages 95–98. IEEE, 2015.
- [44] Yuzhuo Qiu. The effect of clustering-based and degree-based weighting on robustness in symmetrically coupled heterogeneous interdependent networks. In *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pages 3984–3988. IEEE, 2013.
- [45] Yuzhuo Qiu. Optimal weighting scheme and the role of coupling strength against load failures in degree-based weighted interdependent networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(8):1920–1924, 2013.
- [46] Filippo Radicchi. Percolation in real interdependent networks. *Nature Physics*, 11(7):597–602, 2015.
- [47] Filippo Radicchi and Alex Arenas. Abrupt transition in the structural formation of interconnected networks. *Nature Physics*, 9(11):717–720, 2013.
- [48] Mahshid Rahnamay-Naeini and Majeed Hayat. Cascading failures in interdependent infrastructures: An interdependent markov-chain approach.
- [49] Gyan Ranjan and Zhi-Li Zhang. How to ‘glue’ a robust smart-grid?
- [50] VJ Rayward-Smith. Combinatorial optimization by william j. cook, william h. cunningham, william r. pulleyblank and alexander schrijver, wiley, new york, 1998. isbn 0-471-55894-x. no. of pages: 355. price:£ 24.95. *International Journal of Numerical Modelling*:

Electronic Networks, Devices and Fields, 11(5):273–273, 1998.

- [51] Saulo DS Reis, Yanqing Hu, Andrés Babino, José S Andrade Jr, Santiago Canals, Mariano Sigman, and Hernán A Makse. Avoiding catastrophic failure in correlated networks of networks. *Nature Physics*, 10(10):762–767, 2014.
- [52] DF Rueda, E Calle, FA Maldonado-Lopez, and Y Donoso. Reducing the impact of targeted attacks in interdependent telecommunication networks. In *Telecommunications (ICT), 2016 23rd International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [53] Christian M Schneider, André A Moreira, José S Andrade, Shlomo Havlin, and Hans J Herrmann. Mitigation of malicious attacks on networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(10):3838–3841, 2011.
- [54] Christian M Schneider, Nuri Yazdani, Nuno AM Araújo, Shlomo Havlin, and Hans J Herrmann. Towards designing robust coupled networks. *Scientific reports*, 3, 2013.
- [55] Ricard V Sole and M^a Montoya. Complexity and fragility in ecological networks. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 268(1480):2039–2045, 2001.
- [56] Dietrich Stauffer and Ammon Aharony. *Introduction to percolation theory*. CRC press, 1994.
- [57] Marcell Stippinger and János Kertész. Enhancing resilience of interdependent networks by healing. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 416:481–487, 2014.
- [58] Shiwen Sun, Yafang Wu, Yilin Ma, Li Wang, Zhongke Gao, and Chengyi Xia. Impact of degree heterogeneity on attack vulnerability of interdependent networks. *Scientific Reports*, 6, 2016.
- [59] Liang Tang, Ke Jing, Jie He, and H Eugene Stanley. Complex interdependent supply chain networks: Cascading failure and robustness. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 443:58–69, 2016.
- [60] Jianwei Wang, Chen Jiang, and Jianfei Qian. Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 393:535–541, 2014.
- [61] Jianwei Wang, Yun Li, and Qiaofang Zheng. Cascading load model in interdependent networks with coupled strength. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 430:242–253, 2015.
- [62] Shuai Wang and Jing Liu. Robustness of single and interdependent scale-free interaction networks with various parameters. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 460:139–151, 2016.
- [63] Xingyuan Wang, Jianye Cao, and Xiaomeng Qin. Study of robustness in functionally identical coupled networks against cascading failures. *PloS one*, 11(8):e0160545, 2016.

- [64] Yongxiang Xia, Wenping Zhang, and Xuejun Zhang. The effect of capacity redundancy disparity on the robustness of interconnected networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 447:561–568, 2016.
- [65] Qiong Zhang, Daqing Li, Rui Kang, Enrico Zio, and Peng Zhang. Reliability analysis of interdependent networks using percolation theory. In *Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS), 2013 International Conference on*, pages 626–629. IEEE, 2013.
- [66] Wenping Zhang, Yongxiang Xia, Bo Ouyang, and Lurong Jiang. Effect of network size on robustness of interconnected networks under targeted attack. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 435:80–88, 2015.
- [67] Xian Zhang, Chris Phillips, and Xiuzhong Chen. An overlay mapping model for achieving enhanced qos and resilience performance. In *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on*, pages 1–7. IEEE, 2011.
- [68] Xue-Jun Zhang, Guo-Qiang Xu, Yan-Bo Zhu, and Yong-Xiang Xia. Cascade-robustness optimization of coupling preference in interconnected networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 92:123–129, 2016.
- [69] Da-wei Zhao, Lian-hai Wang, Yong-feng Zhi, Jun Zhang, and Zhen Wang. The robustness of multiplex networks under layer node-based attack. *Scientific reports*, 6, 2016.
- [70] Zhuang Zhao, Peng Zhang, and Hujiang Yang. Cascading failures in interconnected networks with dynamical redistribution of loads. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 433:204–210, 2015.
- [71] Jun Zheng, Mingzeng Hu, and Liyuan Zhao. Enhancing internet robustness against malicious flows using active queue management. In *null*, pages 501–506. IEEE, 2005.
- [72] Qian Zhu, Zhiliang Zhu, Yifan Wang, and Hai Yu. Fuzzy-information-based robustness of interconnected networks against attacks and failures. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 458:194–203, 2016.

Capítulo 7

Apéndice

Tabla 7.5: Lista de clasificaciones de estudios

Clasificación	descripción	papers
“tamaño de la componente gigante”	Estudios sobre el tamaño de la componente conexa más grande. Puede contener estudios de promedios de su tamaño u otras variaciones.	[11, 65, 54, 9, 39, 29, 51, 57, 40, 18, 33, 25, 13, 14, 26, 66, 27, 15, 28, 62, 34, 72, 68, 36, 58, 37, 69, 17, 21, 22, 12, 59, 20]
“acoplamiento”	Estudios de cómo se acoplan la redes interdependientes. Puede ser en cuanto a fuerza como a estrategia de acoplamiento.	[49, 54, 9, 45, 16, 19, 60, 29, 38, 51, 40, 14, 25, 18, 33, 23, 66, 61, 28, 20, 62, 72, 68, 36, 58, 37, 24, 22, 52, 64]
“percolación”	Estudios derivados de la teoría de percolación. Típicamente umbral de percolación.	[11, 54, 9, 16, 19, 29, 51, 57, 18, 26, 33, 46, 10, 23, 27, 15, 17, 37, 36, 72, 20]
“Ataques intencionales”	Ataques que determinan que elemento atacar según algún parámetro específico como grado o carga de un nodo.	[39, 15, 13, 25, 14, 26, 70, 61, 66, 12, 64, 20, 62, 68, 58, 24, 52, 69]
“carga y capacidad”	Estudios sobre el efecto de alterar las capacidades y cargas del modelo.	[45, 44, 25, 14, 70, 27, 61, 66, 59, 7, 63, 35, 68, 64]

“optimización”	Estudios de optimización que buscan aumentar la robustez o detectar vulnerabilidades.	[67, 39, 45, 42, 44, 33, 7]
“Costoo”	Estudios sobre el Costo de mejorar la red.	[67, 45, 44, 33, 7, 35]
“Avalancha”	Estudia la cantidad de nodos que deja de ser funcional luego de un fallo en cascada.	[60, 61, 14, 24, 35]
“Tiempo de cascada”	Estudios del tiempo que toma un fallo en cascada.	[16, 9, 19, 15]
“Recuperación”	Estudios del proceso recuperación de de un sistema interdependiente	[23, 41, 21, 17]
“Largo de arco”	Estudio de los efectos de modificar el largo de arcos en la robustez de la red.	[16, 10, 34]
“Algoritmo genético”	Estudios de algoritmos genéticos para crear redes interdependientes robustas.	[6, 41]
“Laplaciano”	Estudios que se basan en la matriz laplaciana para estudiar la red.	[49, 47]
“Tiempo de vida”	Estudios sobre el tiempo de vida de una red dado que sus arcos y nodos tienen una cierta esperanza de vida.	[65, 34]
“Ataques localizados”	Estudios de ataques que se centran en un nodo (puede ser o no elegido al azar) e infringen daño en un radio alrededor de él.	[6, 10]
“Probabilidad de fallos”	Estudios sobre la probabilidad o distribución de probabilidad de fallos en un sistema.	[35, 69]
"Delay"	Estudios del tiempo de demora de servicios provistos por el sistemas interdependientes.	[67]
“Cadenas de markov”	Estudios sobre redes cuyo comportamiento se puede modelar con cadenas de Markov.	[48]
“Contraste con red aislada”	Estudios de la robustez del sistema interdependiente en comparación con una red aislada	[60]
“Clusters funcionales”	Estudios sobre la cantidad de pequeños clusters funcionales y su tamaño. Estos clusters pueden ser variados y más pequeños que la componente gigante.	[26]

"Radio de ataque"	Estudios sobre la estabilidad de redes con restricciones físicas. Se dice que el sistema es estable si para un ataque de radio finito esta no decae abruptamente, metaestable si existe un radio de ataque luego del cual el sistema colapsa e inestable si para un ataque de cualquier radio la red queda destruida.	[10]
"Prob. de detención de cascada"	Estudios sobre la probabilidad de que en el siguiente paso del fallo en cascada ésta se detenga.	[48]
"PMF del tamaño de falla"	Estudios sobre el comportamiento del PMF (Probability Mass Function) del tamaño de falla.	[48]
"Número de componentes"	Estudios sobre la cantidad de componentes conexas de un sistema y/o sus características.	[12]
"Información para atacar"	Estudios sobre el efecto que tiene la cantidad de información que posee un atacante sobre la red al momento de atacar.	[72]

Tabla 7.6: Lista de papers incluidos en la revisión sistemática

Título	Cita
Catastrophic cascade of failures in interdependent networks	[11]
How to 'Glue' a Robust Smart-Grid?	[49]
An Overlay Mapping Model for Achieving Enhanced QoS and Resilience Performance	[67]
Interdependent Spatially Embedded Networks: Dynamics at Percolation Threshold	[16]
Optimal weighting scheme and the role of coupling strength against load failures in degree-based weighted interdependent networks	[45]
The extreme vulnerability of interdependent spatially embedded networks	[9]
Reliability Analysis of Interdependent Networks Using Percolation Theory	[65]
Towards designing robust coupled networks	[54]
Robustness of Interdependent Networks: The case of communication networks and the power grid	[42]
Abrupt transition in the structural formation of interconnected networks	[47]
Detecting Critical Nodes in Interdependent Power Networks for Vulnerability Assessment	[39]
The effect of clustering-based and degree-based weighting on robustness in symmetrically coupled heterogeneous interdependent networks	[44]
Study of the Use of a Genetic Algorithm to Improve Networked System-of-Systems Resilience	[6]
The effect of interdependence on the percolation of interdependent networks	[29]

Analysis of percolation behaviors of clustered networks with partial support-dependence relations	[19]
Avoiding catastrophic failure in correlated networks of networks	[51]
Enhancing resilience of interdependent networks by healing	[57]
Modeling the Interaction of Power Line and SCADA Networks	[38]
Robustness of interdependent networks with different link patterns against cascading failures	[60]
Design of Robust Dependent Networks against Flow-based Cascading Failures	[40]
Robust allocation of weighted dependency links in cyber-physical networks	[33]
Cascading failure of interdependent networks with different coupling preference under targeted attack	[14]
Resilience assessment of interdependent infrastructure systems: With a focus on joint restoration modeling and analysis	[41]
Cascading failure propagation in interconnected networks with tunable load redistribution strategy	[25]
Robustness of network of networks with interdependent and interconnected links	[18]
Towards Optimal Link Patterns for Robustness of Interdependent Networks against Cascading Failures	[13]
Small Cluster in Cyber Physical Systems: Network Topology, Interdependence and Cascading Failures	[26]
Effect of network size on robustness of interconnected networks under targeted attack	[66]
Cascading load model in interdependent networks with coupled strength	[61]
Cascading Failures in Smart Grid: Joint Effect of Load Propagation and Interdependence	[27]
Enhancing robustness of coupled networks under targeted recoveries	[23]
Cascading failures in interconnected networks with dynamical redistribution of loads	[70]
Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks	[15]
Localized attacks on spatially embedded networks with dependencies	[10]
Percolation in real interdependent networks	[46]
Impact of Degree Heterogeneity on Attack Vulnerability of Interdependent Networks	[58]
Cascading failures in coupled networks: The critical role of node-coupling strength across networks	[36]
Cascade-robustness optimization of coupling preference in interconnected networks	[68]
Fuzzy-information-based robustness of interconnected networks against attacks and failures	[72]
Reliability analysis of interdependent lattices	[34]
Robustness of single and interdependent scale-free interaction networks with various parameters	[62]
Targeted attack on networks coupled by connectivity and dependency links	[20]
The effect of capacity redundancy disparity on the robustness of interconnected networks	[64]

Cascading failures in coupled networks with both inner-dependency and inter-dependency links	[37]
Recovery of Interdependent Networks	[17]
Complex interdependent supply chain networks: Cascading failure and robustness	[59]
Improving interdependent networks robustness by adding connectivity links	[28]
Cascading Failures in Interdependent Infrastructures: An Interdependent Markov-Chain Approach	[48]
Supporting differentiated resilience classes in multilayer networks	[7]
Resilience of interdependent communication and power distribution networks against cascading failures	[12]
Reducing the impact of targeted attacks in interdependent telecommunication networks	[52]
Shell attack on interdependent networks	[22]
percolation theory incorporating power flow analysis to model cascading failures in Cyber-Physical Power System	[24]
Study of Robustness in Functionally Identical Coupled Networks against Cascading Failures	[63]
Redundant Design in Interdependent Networks	[35]
Operational resilience: concepts, design and analysis	[21]
The robustness of multiplex networks under layer node-based attack	[69]

Tabla 7.7: Lista de papers según modelo y métrica usadas

Modelo	Métrica	Citas
Tipo one-to-one	Cantidad de elementos	[9, 54, 57, 6, 60, 14, 13, 15, 61, 23, 12, 62, 68, 36, 17, 21, 35, 28, 22]
Tipo one-to-one	Punto de quiebre	[11, 49, 47, 65, 16, 57, 60, 46, 15, 10, 22, 36, 34]
Red eléctrica acoplada	Cantidad de elementos	[40, 38, 27, 26, 24]
Dependencias múltiples	Cantidad de elementos	[39, 51, 29, 33, 13]
Transmisión de carga entre redes	Cantidad de elementos	[66, 25, 63, 72, 64]
Tipo one-to-one	Tiempo	[16, 9, 15, 17]
Mezcla de interacción intra/inter red	Cantidad de elementos	[18, 69, 37, 20]
Tipo one-to-one	Probabilidad	[11, 46, 52]
Dependencias múltiples	Punto de quiebre	[19, 51, 29]
Red eléctrica acoplada	Punto de quiebre	[42, 27]
Tipo one-to-one	Largo de camino	[12, 58]
Dependencias múltiples	Costo	[45, 44]

Mezcla de interacción intra/inter red	Punto de quiebre	[18, 20]
Mapeo	Tiempo	[67, 7]
Transmisión de carga entre redes	Punto de quiebre	[66, 25]
Cadena de suministro	Cantidad de elementos	[59]
Definido por probabilidades	Probabilidad	[48]
Red eléctrica acoplada	Desempeño	[41]
Tipo one-to-one	Ratio	[6]
Dependencias múltiples	Tiempo	[19]
Mapeo	Costo	[67]
Mapeo	Cantidad de elementos	[67]
Transmisión de carga entre redes	Largo de camino	[70]

Tabla 7.8: Lista de papers según estudios realizados y redes usadas para testeo

Estudio	Tipo de redes de testeo	Citas
Tamaño de la componente gigante	Simuladas	[11, 65, 57, 29, 14, 13, 25, 15, 18, 27, 66, 22, 28, 20, 62, 34, 36, 58, 37, 59, 17, 69]
Acoplamiento	Simuladas	[16, 45, 19, 38, 29, 25, 14, 18, 61, 66, 28, 64, 20, 62, 36, 58, 37, 24, 52, 22]
Ataques intencionales	Simuladas	[15, 13, 25, 14, 66, 61, 24, 69, 52, 62, 20, 64, 58]
Percolación	Simuladas	[11, 16, 19, 29, 57, 27, 10, 15, 18, 17, 37, 36, 20]
Tamaño de la componente gigante	Simuladas y reales	[9, 54, 39, 51, 40, 26, 33, 12, 21, 68, 72]
Acoplamiento	Simuladas y reales	[49, 9, 54, 60, 51, 40, 33, 23, 68, 72]
Carga y capacidad	Simuladas	[45, 44, 27, 25, 14, 66, 61, 35, 64, 59]
Percolación	Simuladas y reales	[9, 54, 51, 23, 46, 26, 72]
Ataques intencionales	Simuladas y reales	[39, 70, 26, 12, 68]
Optimización	Simuladas y reales	[39, 42, 33, 7]
Costo	Simuladas	[67, 45, 44, 35]
Carga y capacidad	Simuladas y reales	[70, 7, 63, 68]
Avalancha	Simuladas	[61, 14, 24, 35]
Recuperación	Simuladas y reales	[23, 41, 21]
Optimización	Simuladas	[67, 45, 44]
Largo de arco	Simuladas	[16, 10, 34]

Tiempo de cascada	Simuladas	[16, 19, 15]
Ataques localizados	Simuladas	[6, 10]
Tiempo de vida	Simuladas	[65, 34]
Costo	Simuladas y reales	[33, 7]
Radio de ataque	Simuladas	[10]
Clusters funcionales	Simuladas y reales	[26]
Contraste con red aislada	Simuladas y reales	[60]
Recuperación	Simuladas	[17]
Laplaciano	Simuladas	[47]
Laplaciano	Simuladas y reales	[49]
Algoritmo genético	Simuladas	[6]
Algoritmo genético	Simuladas y reales	[41]
Delay	Simuladas	[67]
Número de componentes	Simuladas y reales	[12]
Tiempo de cascada	Simuladas y reales	[9]
Avalancha	Simuladas y reales	[60]
Prob. de detención de cascada	Simuladas	[48]
Probabilidad de fallos	Simuladas	[69]
PMF del tamaño de falla	Simuladas	[48]
Cadenas de Markov	Simuladas	[48]
Información para atacar	Simuladas y reales	[72]

Tabla 7.1: Tabla resumen: parte I

Papers	[11]	[67]	[49]	[47]	[39]	[16]	[45]	[65]	[42]	[44]	[9]	[54]	[19]	[51]	[40]
Modelos	Tipo one-to-one	✓		✓	✓		✓		✓		✓	✓			
	Dependencias múltiples					✓		✓		✓			✓	✓	
	Red eléctrica acoplada								✓						✓
	Transmisión de carga entre redes														
	Mezcla de interacción intra/inter red														
	Mapeo		✓												
	Cadena de suministro														
	Definido por probabilidades														
Métricas	Cantidad de elementos		✓			✓					✓	✓		✓	✓
	Punto de quiebre	✓		✓	✓		✓		✓	✓			✓	✓	
	Tiempo		✓				✓				✓		✓		
	Probabilidad	✓													
	Costo		✓					✓		✓					
	Largo de camino														
	Ratio														
	Desempeño														
Estudios	Tamaño de la componente gigante	✓				✓			✓		✓	✓		✓	✓
	Acoplamiento			✓			✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓
	Percolación	✓					✓				✓	✓	✓	✓	
	Ataques intencionales					✓									
	Carga y capacidad							✓		✓					
	Optimización		✓			✓		✓		✓	✓				
	Costo		✓					✓		✓					
	Avalancha														
	Tiempo de cascada						✓				✓		✓		
	Recuperación														
	Largo de arco						✓								
	Algoritmo genético														
	Laplaciano			✓	✓										
	Tiempo de vida								✓						
	Ataques localizados														
	Probabilidad de fallos														
	Delay		✓												
	Cadenas de Markov														
	Contraste con red aislada														
	Clusters funcionales														
	Radio de ataque														
	Prob. de detención de cascada														
	PMF del tamaño de falla														
Número de componentes															
Información para atacar															
Redes	Simuladas y reales			✓		✓			✓		✓	✓		✓	✓
	Simuladas	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓			✓		

Tabla 7.2: Tabla resumen: parte II

Papers	[38]	[6]	[29]	[60]	[57]	[15]	[14]	[13]	[25]	[18]	[26]	[33]	[46]	[10]	[23]
Modelos	Tipo one-to-one		✓		✓	✓	✓	✓					✓	✓	✓
	Dependencias múltiples			✓				✓				✓			
	Red eléctrica acoplada	✓									✓				
	Transmisión de carga entre redes								✓						
	Mezcla de interacción intra/inter red									✓					
	Mapeo														
	Cadena de suministro														
	Definido por probabilidades														
Métricas	Cantidad de elementos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓
	Punto de quiebre			✓		✓	✓			✓	✓		✓	✓	
	Tiempo						✓								
	Probabilidad												✓		
	Costo														
	Largo de camino														
	Ratio		✓												
	Desempeño														
Estudios	Tamaño de la componente gigante			✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	Acoplamiento	✓		✓	✓		✓			✓	✓	✓			✓
	Percolación			✓		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Ataques intencionales						✓	✓	✓		✓				
	Carga y capacidad							✓		✓					
	Optimización												✓		
	Costo												✓		
	Avalancha				✓			✓							
	Tiempo de cascada						✓								
	Recuperación														✓
	Largo de arco													✓	
	Algoritmo genético		✓												
	Laplaciano														
	Tiempo de vida														
	Ataques localizados		✓											✓	
	Probabilidad de fallos														
	Delay														
	Cadenas de Markov														
	Contraste con red aislada				✓										
	Clusters funcionales											✓			
Radio de ataque													✓		
Prob. de detención de cascada															
PMF del tamaño de falla															
Número de componentes															
Información para atacar															
Redes	Simuladas y reales				✓						✓	✓	✓		✓
	Simuladas	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓	

Tabla 7.3: Tabla resumen: parte III

Papers		[66]	[61]	[27]	[70]	[41]	[28]	[69]	[37]	[58]	[36]	[68]	[72]	[34]	[62]	[20]
Modelos	Tipo one-to-one		✓				✓			✓	✓	✓		✓	✓	
	Dependencias múltiples															
	Red eléctrica acoplada			✓		✓										
	Transmisión de carga entre redes	✓			✓								✓			
	Mezcla de interacción intra/inter red							✓	✓							✓
	Mapeo															
	Cadena de suministro															
	Definido por probabilidades															
Métricas	Cantidad de elementos	✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓
	Punto de quiebre	✓	✓	✓							✓			✓		✓
	Tiempo															
	Probabilidad															
	Costo															
	Largo de camino				✓					✓						
	Ratio															
	Desempeño					✓										
Estudios	Tamaño de la componente gigante	✓		✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Acoplamiento	✓	✓				✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
	Percolación			✓					✓		✓		✓			✓
	Ataques intencionales	✓	✓		✓			✓		✓		✓			✓	✓
	Carga y capacidad	✓	✓	✓	✓							✓				
	Optimización															
	Costo															
	Avalancha		✓													
	Tiempo de cascada															
	Recuperación					✓										
	Largo de arco													✓		
	Algoritmo genético					✓										
	Laplaciano															
	Tiempo de vida													✓		
	Ataques localizados															
	Probabilidad de fallos								✓							
	Delay															
	Cadenas de Markov															
	Contraste con red aislada															
	Clusters funcionales															
	Radio de ataque															
	Prob. de detención de cascada															
	PMF del tamaño de falla															
Número de componentes																
Información para atacar													✓			
Redes	Simuladas y reales				✓	✓						✓	✓			
	Simuladas	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓

Tabla 7.4: Tabla resumen: parte IV

Papers	[17]	[21]	[59]	[48]	[7]	[12]	[52]	[22]	[24]	[63]	[35]	[64]
Modelos	Tipo one-to-one	✓	✓			✓	✓	✓			✓	
	Dependencias múltiples											
	Red eléctrica acoplada								✓			
	Transmisión de carga entre redes									✓		✓
	Mezcla de interacción intra/inter red											
	Mapeo					✓						
	Cadena de suministro			✓								
	Definido por probabilidades				✓							
Métricas	Cantidad de elementos	✓	✓	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓
	Punto de quiebre							✓				
	Tiempo	✓				✓						
	Probabilidad				✓		✓					
	Costo											
	Largo de camino					✓						
	Ratio											
	Desempeño											
Estudios	Tamaño de la componente gigante	✓	✓	✓		✓		✓				
	Acoplamiento							✓	✓			✓
	Percolación	✓					✓		✓			
	Ataques intencionales					✓	✓					✓
	Carga y capacidad			✓		✓				✓	✓	✓
	Optimización					✓						
	Costo					✓					✓	
	Avalancha								✓		✓	
	Tiempo de cascada											
	Recuperación	✓	✓									
	Largo de arco											
	Algoritmo genético											
	Laplaciano											
	Tiempo de vida											
	Ataques localizados											
	Probabilidad de fallos										✓	
	Delay											
	Cadenas de Markov				✓							
	Contraste con red aislada											
	Clusters funcionales											
	Radio de ataque											
	Prob. de detención de cascada											
	PMF del tamaño de falla				✓							
Número de componentes					✓							
Información para atacar												
Redes	Simuladas y reales		✓		✓	✓				✓		
	Simuladas	✓		✓	✓		✓	✓	✓		✓	✓