



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD: APLICACIÓN AL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL DE BOLIVIA

MARYSOL AYALA SANTANDER

Tesis para optar al grado de
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
DAVID WATTS CASIMIS

Santiago de Chile, marzo 2012

© 2012, Marysol Ayala Santander



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

TEORÍA DE LA COMPLEJIDAD: ENFOQUE APLICADO AL ANÁLISIS DE FALLAS DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL DE BOLIVIA

MARYSOL AYALA SANTANDER

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

DAVID WATTS CASIMIS

HUGH RUDNICK

YARELA FLORES

PABLO PASTÉN

Para completar las exigencias del grado de

Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, marzo 2012

A mis Padres, responsables de todos
mis logros y a mis hermanos por la
complicidad en todas mis decisiones.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su presencia constante en mi vida dándome la fuerza necesaria en todo momento que precisé y con certeza siempre precisaré.

Al Profesor David Watts por la comprensión, confianza, dedicación y paciencia desprendida durante el desarrollo de esta investigación.

A los Profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica por la formación académica.

A los Funcionarios del Departamento de Ingeniería Eléctrica y del Postgrado en Ingeniería por la colaboración y apoyo.

A mis compañeros y amigos por todo su apoyo y amistad.

A la AGCI por el apoyo económico otorgado a través de la beca.

A mis padres y hermanos por todo su amor, motivación, apoyo en los momentos de mayor dificultad y confianza en mis acciones.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. APORTES DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN	4
3. HIPÓTESIS	5
4. ESTADO DEL ARTE.....	6
5. MARCO TEÓRICO.....	10
5.1 Enfoque Tradicional vs Nuevo Enfoque	10
5.2 Teoría de la Complejidad	13
5.3 Criticalidad Auto-organizada	17
5.3.1 Auto-Organización	20
5.3.2 Criticalidad	21
5.3.3 Aplicación	21
5.4 Ley de Potencia (Power law).....	22
5.4.1 Aplicación	24
5.5 Coeficiente de Hurst	26
5.5.1 Método Re-escalado (R/S).....	27
5.5.2 Aplicación	29
5.6 No Linealidad	31
6. METODOLOGÍA.....	34

6.1	Recolección de Información.....	34
6.2	Procesamiento de Información.....	35
6.3	Resultados Obtenidos.....	36
7.	CASO DE ESTUDIO: SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL DE BOLIVIA.....	37
7.1	Características del Sistema Interconectado Nacional de Bolivia	37
7.2	Base de Datos	39
7.3	Resultados	40
7.3.1	Criticalidad Auto-organizada y Ley de Potencia.....	40
a)	Energía no Suministrada	40
b)	Potencia Desconectada.....	41
c)	Alimentadores Desconectados (Profundidad)	42
d)	Tiempo entre Fallas	44
7.3.2	Coeficiente de Hurst	45
7.3.3	No linealidad (Evaluación del Impacto de las Fallas)	46
7.3.4	Comparación con Grandes Sistemas.....	47
8.	CONCLUSIONES.....	48
9.	TRABAJOS FUTUROS	51
	BIBLIOGRAFÍA	52
	A N E X O S.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Clasificación de los modelos y métodos para el tratamiento de las fallas en cascada y blackouts.....	7
Tabla 7.1: Resultados de la regresión del coeficiente Hurst	45
Tabla 7.2: Comparación del coeficiente de Hurst	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5-1. Distribución de población (Fuente: Newman, 2004).....	11
Figura 5-2: Curva de distribución normal (Fuente: Calduch)	12
Figura 5-3: Mapeo de la historia de la teoría de la complejidad	14
Figura 5-4: Características de la teoría de complejidad.....	15
Figura 5-5: Características de la teoría de complejidad. Aplicación al sistema eléctrico....	16
Figura 5-6: Propiedades de la teoría de complejidad.....	17
Figura 5-7: Esquema de la Criticalidad auto-organizada.....	19
Figura 5-8: Esquema de la Criticalidad auto-organizada. Aplicación al sistema eléctrico..	20
Figura 5-9 Distribución de la ley de potencia (power law).....	23
Figura 5-10: Ejemplos que muestran la distribución de la ley de potencia	23
Figura 5-11: Distribución de la ley de potencia de accidentes nucleares Fuente: (Asahi, 2011)	25
Figura 5-12: Diagrama de flujo para la determinación del coeficiente de Hurst	28
Figura 5-13: Relación no lineal causa-efecto	31
Figura 5-14. Matriz para la evaluación del riesgo (Fuente: (Yañez, 2010))	32
Figura 6-1: Diagrama de flujos de la metodología	34
Figura 6-2: Recolección de información de fallas	35
Figura 7-1: Composición del parque generador en el sistema eléctrico de Bolivia.	37
Figura 7-2: Composición de la capacidad instalada por empresa	38
Figura 7-3: Capacidad de transmisión del SIN de Bolivia.....	38
Figura 7-4: Causas que originaron las fallas en el SIN.....	39
Figura 7-5: Evolución de los colapsos del SIN de Bolivia.	39
Figura 7-6: Análisis de las series de tiempo de ENS. Histograma de los datos de ENS.	40
Figura 7-7: Análisis de las series de tiempo de ENS. Gráfico log-log de la función de distribución de probabilidad de la ENS	41
Figura 7-8: Análisis de las series de tiempo de la potencia desconectada en cada falla. Histograma de la magnitud de la potencia desconectada en cada falla	42

Figura 7-9: Análisis de las series de tiempo de la potencia desconectada en cada falla. Gráfico log-log de la función de distribución de probabilidad de la potencia desconectada.....	42
Figura 7-10: Análisis de las series de tiempo de la profundidad de la falla. Histograma de la cantidad de alimentadores desconectados en cada falla.	43
Figura 7-11: Análisis de las series de tiempo de la profundidad de la falla. Gráfico log-log de la función de distribución de probabilidad de la profundidad.	43
Figura 7-12: Tiempo entre fallas para el periodo 2005 al 2011	44
Figura 7-13: Análisis de las series de tiempo de la profundidad de las fallas. Histograma del tiempo entre fallas.	44
Figura 7-14: Análisis de las series de tiempo de la profundidad de la falla. Gráfico log-log de la función de distribución de probabilidad del tiempo entre fallas.	45
Figura 7-16: Costo de la falla	46
Figura 7-17. Comparación de modelos que denotan el comportamiento del tiempo entre fallas. Lado izquierdo, modelo obtenido por Dobson con la información de NERC. Lado derecho, modelo obtenido para el sistema boliviano	47

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A : ESTADÍSTICAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE BOLIVIA	60
ANEXO B : ARTÍCULO PRESENTADO A LA REVISTA IEEE LATINOAMERICANO.....	63

RESUMEN

En los últimos años la ocurrencia de blackouts y su impacto en la sociedad pone en consideración la planificación tradicional y el análisis de confiabilidad que se enfoca en eventos de bajo impacto sin considerar explícitamente situaciones catastróficas como el blackout. La teoría de complejidad da lugar a conceptos ampliamente usados en otras áreas como economía, abriendo un nuevo campo de estudio en sistemas eléctricos. Esta teoría podría proveer de herramientas complementarias para el análisis tradicional, ayudando de esta manera en la planificación, cuantificación y modelamiento de eventos con una baja probabilidad de ocurrencia y alto impacto para la sociedad, como es el blackout y las fallas en cascada. Este nuevo concepto es aplicado para la caracterización del sistema eléctrico de Bolivia, siendo una primera aplicación a un sistema Latinoamericano. El resultado obtenido es consistente con el comportamiento dado por la ley de potencia, lo que sugiere un sistema complejo caracterizado por una criticalidad auto-organizada (SOC) y con una memoria de largo plazo, donde eventos pequeños pueden propagarse dando lugar a los blackouts. Este resultado sugiere que esta teoría no solo es apropiada para describir sistemas grandes como los de China y Estados Unidos, también es posible su aplicación para sistemas pequeños como el de Bolivia u otro de Latinoamérica. Esto nos indica que los blackouts dan lugar a riesgos significativos que requieren ser modelados y administrados explícitamente.

Palabras Claves: teoría de la complejidad, criticalidad auto-organizada, ley de potencia, coeficiente de Hurst, fallas en cascada, blackouts

ABSTRACT

The occurrence of blackouts in recent years and their impact on society call into question the traditional planning and reliability analysis, which focuses on events of significant chances, without explicitly considering the development of catastrophic situations such as blackouts. The complexity theory provides concepts widely applied in other areas, such as economics and science, opening a new field of study in electrical systems. This would provide complementary tools to traditional analysis, helping explaining, quantifying and modeling events with very low probability and high impact for society, such as blackouts and cascading failures. These new concepts are applied to characterize the Bolivian power system, marking the first application to a Latin American system. Results are surprising

because of its failure behavior is consistent with a “power law”, suggesting a complex system, characterized by self-organized criticality (SOC) with long-term memory, where small perturbations can propagate out producing blackouts. This suggests that this theory would be appropriate not only to describe giant systems such as those from China and the U.S., but also for smaller systems, such as the Bolivian and other Latin American ones. It was shown that blackouts provide significant risks that would require explicit modeling and risk management.

1. INTRODUCCIÓN

Bajo el enfoque tradicional se acostumbra a crear historias simples (supuestos o simplificaciones) sobre fenómenos muy complejos y variados, como resultado de ello se pierde el control de la realidad y no se tiene la capacidad para predecir anomalías estadísticas o simplemente no se las considera por ser improbables (Villarroel, 2010). El nuevo enfoque considera el rol de los eventos inesperados de gran magnitud y alto impacto y su papel dominante en la historia. Estos eventos, considerados como atípicos y extremos (terremotos, accidentes nucleares, ataques especulativos, etc.), colectivamente juegan un rol mucho mayor que los eventos regulares (Wikipedia, 2011a). En sistemas eléctricos de potencia, un evento improbable pero de gran impacto negativo es el blackout, ya que cuando ocurre conlleva a pérdidas de tipo social, político y económico afectando a todo un país.

En diversas disciplinas, el análisis convencional de planificación no considera eventos extraordinarios, así por ejemplo, en el terremoto de Japón ocurrido el 11 de marzo de 2011, los muros de contención para hacer frente a las olas producidas por el maremoto no fueron construidos considerando olas de más de 40 metros de alto (Wikipedia, 2011b), ya que el acontecimiento de este evento era poco probable. En ese sentido, es necesario considerar nuevos conceptos que permitan entender, caracterizar y prevenir estos eventos. Como respuesta a esta necesidad se ha desarrollado la teoría de la complejidad, ampliamente aplicado en otras áreas, que ha permitido afrontar problemas que hasta hace poco no eran debidamente abordados. (Reynoso, 2006; Tercero, 2009) Esta teoría, considera que la materia, los sistemas, etc. se auto-organizan, que coexisten en ella el orden y el desorden a la vez, que a raíz de las turbulencias previas emergen nuevas estructuras y que son diferentes a las que le dieron origen. Bajo esta teoría se define que los sistemas complejos son aquellos formados por varios componentes cuyo comportamiento colectivo emerge de la interacción de cada uno de ellos. Algunas de las propiedades de la teoría de complejidad son la criticalidad auto-organizada, la ley de potencia, memoria de largo plazo y la no linealidad (Morin, 2007; Tercero, 2009).

La ley de potencia (power law) permite identificar sistemas que pueden ser candidatos a ser estudiados a través de la teoría de la complejidad (Bar-Yam, 2004). Esta ley forma

parte del conjunto de distribuciones sesgadas hacia los valores extremos y explica que grandes eventos tienen baja probabilidad de ocurrencia y son bastante significativas en comparación a eventos menores ($Riesgo = Prob.Falla * Impacto$) por lo que es importante considerarlas. Este tipo de distribuciones puede encontrarse en diferentes sistemas naturales (terremotos) y sociales (desarrollo poblacional) (Cardona, 2007; Carneiro & Charret, 2005; Winslow, 1997). Otro concepto asociado a la teoría de la complejidad es el coeficiente de Hurst que admite analizar la naturaleza de una serie de tiempo y determinar si en un proceso existe la presencia de memoria, lo que permite identificar si el presente es el resultado o no de hechos anteriores (Casparri & Moreno, 2004).

Este nuevo enfoque, a través de la teoría de la complejidad, es perfectamente aplicable a sistemas eléctricos, ya que al estar constituido por un gran conjunto de componentes y que estos tienen una capacidad de operación límite y que están sujetas a una probabilidad de falla, estos pueden alcanzar un punto crítico desde el cual pueden experimentar cambios y en consecuencia pueden impactar en todo el sistema produciendo blackouts, aunque este último evento tenga poca probabilidad de ocurrencia.

En esta investigación se muestra que la teoría de la complejidad, ampliamente utilizada en otras áreas, puede ser considerada como un nuevo enfoque que complementa el análisis tradicional de fallas en sistemas eléctricos para ser considerado posteriormente en la planificación. Para el análisis se toma la serie de datos históricos de las fallas registradas durante el año 2005 y 2011 (hasta junio) en el Sistema Interconectado Nacional de Bolivia (SIN) y que ocasionaron la activación del Esquema de Alivio de Carga (EDAC). Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la teoría de complejidad puede ser perfectamente aplicable a los sistemas eléctricos, puesto que permite contar con herramientas que identifique acontecimientos extraordinarios, mismos que bajo el enfoque tradicional simplemente serían descartados.

En la sección 2 se expone los principales aportes del presente trabajo de investigación. En la sección 3 se plantea la hipótesis del trabajo. En la sección 4, se presenta el resumen de la revisión bibliográfica sobre el tópico de fallas, fallas en cascada y blackouts. En la sección 5 se expone el marco teórico concerniente a la teoría de la complejidad. En la sección 6 se

realiza la descripción de la metodología considerada para la realización de la investigación. En la sección 7 se presenta el caso de aplicación que corresponde al Sistema Interconectado Nacional de Bolivia, se exponen las principales características de este sistema y se presentan los resultados del tratamiento estadístico. En la sección 8 se exponen las conclusiones de la investigación. Finalmente en la sección 9 se plantean sugerencias para el desarrollo de trabajos futuros.

2. APORTES DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN

Para ponderar el aporte de este trabajo, es necesario señalar que en los sistemas eléctricos ocurren blackouts que tienen un alto impacto negativo para la sociedad, por tanto, este evento requiere ser considerado. En esta investigación se muestra que la teoría de la complejidad se presenta como una alternativa científica que introduce nuevos conceptos para analizar los resultados de las fallas en los sistemas eléctricos. En Latinoamérica se presenta como una primera experiencia.

El enfoque de la complejidad y sus conceptos asociados se aplican actualmente en mayor medida en las ciencias naturales y económicas. Destaca en este aspecto su aplicación en el área eléctrica por sus propiedades de auto-organización y complejidad en su estructura que son conceptos que caracterizan al enfoque de la teoría de la complejidad. En tal sentido, esta investigación da lugar a la generación de nuevas líneas de investigación que permite un mayor conocimiento y aplicación de este nuevo enfoque en sistemas eléctricos con la finalidad de prevenir, mitigar y/o administrar el riesgo asociado a los blackouts.

En esta investigación se muestra que la energía no suministrada, potencia desconectada, alimentadores desconectados y tiempo entre fallas tienen un comportamiento que obedece a la distribución de la ley de potencia, mismo que es una característica del sistema críticamente auto-organizado. Así mismo, se muestra que el sistema eléctrico presenta memoria de largo plazo, que da cuenta de que una falla pequeña puede impactar y ocasionar un cambio trascendental en el sistema. Los resultados obtenidos permiten complementar el análisis tradicional que descarta eventos mayores debido a su baja probabilidad de ocurrencia.

Finalmente, el aporte de esta investigación se ubica en la planificación de la expansión de sistemas eléctricos y en el análisis de fallas en cascada porque proporciona un instrumento para la modelación y cuantificación de eventos de gran impacto en sistemas eléctricos con la finalidad de minimizar el riesgo asociado a este evento y maximizar el bienestar social.

3. HIPÓTESIS

En los últimos años se han registrado fallas y blackouts en los sistemas eléctricos que han ocasionado altos impactos negativos en la sociedad. Estos eventos, por sus propiedades son susceptibles de analizarse bajo el enfoque de la teoría de la complejidad debido a que el análisis tradicional no considera eventos de baja probabilidad de ocurrencia y alto impacto.

4. ESTADO DEL ARTE

La revisión bibliográfica realizada muestra que en relación a las fallas en sistemas eléctricos se ha dado mayor importancia al desarrollo de modelos y herramientas para el análisis de fallas en cascada y blackouts que a la caracterización y análisis de la información resultante de las fallas, esto debido principalmente a la carencia de información pública. Los conceptos afines a la teoría de complejidad fueron abordados solamente en los trabajos de Dobson (Dobson & Carreras, 2000; Dobson & Carreras, 2007), Zhao (Hines, Cotilla-Sánchez, & Blumsack, 2011; Hines, O'Hara, Costilla-Sánchez, & Danforth, 2011; Zhao, Zhang, & He, 2009) y Hines (Hines, Cotilla-Sánchez, et al., 2011; Hines, O'Hara, et al., 2011) quienes exponen que en el sistema eléctrico existe la presencia de criticalidad auto-organizada (SOC por sus siglas en inglés de Self-Organized Criticality), la ley de potencia y la existencia de memoria de largo plazo (coeficiente de Hurst). Como conclusión exponen que el sistema funciona cerca de sus límites operacionales, que existe mayor probabilidad de fallas menores y menor probabilidad de blackouts y que existe correlación de largo plazo que da cuenta de que las fallas en cascada no son parte de un proceso aleatorio (Dobson & Carreras, 2000; Dobson & Carreras, 2007).

Con relación a los modelos y herramientas para el análisis de las fallas en cascada y blackouts, los mismos han sido desarrollados a nivel de investigación (ej. Manchester, Cascade, OPA, etc.) y otros con carácter comercial (ACCESS, CAT, TRELSS y POM-PCM) (Baldick, et al., 2008; Papic, 2011; Vaiman, et al., 2011a, 2011b; D. Watts & Hui, 2008; D. Watts & Ren, 2007), el resumen es mostrado en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Clasificación de los modelos y métodos para el tratamiento de las fallas en cascada y blackouts

Tipo	Criterio	Modelo/Metodología
Modelos de estado estable	Análisis histórico	Teoría de la complejidad
	Contingencias	Criterio N-1
		Criterio N-x
	Simulación determinística	TRELSS
		OPA (Oak Ridge-Alaska PSERC)
		Manchester
		ORI
		CAT (Cascade analysis tool)
		TAM (Texas A&M university)
		POM-PCM (Physical and Operational Margins - Potential Cascading Modes)
		ACCESS
		Hidden Failure
		Cascade
Modelos de alto nivel probabilístico	Simulación probabilística	Branching process
		PSA (Power system analyzer)
		Cluster distribution
		Small - world network
	Modelo de topología de redes	Scale - Free network
		Betweenness centrality
		Complex network

Las fallas en cascada y los blackouts han sido estudiados desde diferentes perspectivas. Algunos de estos estudios están basados en modelos de estado estable (Tabla 4.1), como es el caso del análisis de datos históricos desarrollado por Dobson y Zhao (Carreras, Newman, Dobson, & Poole, 2001, 2004). Este modelo consiste en identificar las tendencias en los registros históricos de parámetros como la energía no suministrada (ENS), potencia desconectada, tiempo entre fallas, consumidores afectados, alimentadores desconectados y descripción de la falla (Carreras, et al., 2001, 2004). Otro modelo de estado estable es el denominado “Branching process”, que a través de un análisis estadístico estima la propagación de fallas y expone que en el proceso de ramificación cada falla, de forma independiente, produce una distribución de fallas en la próxima generación y el proceso se detiene cuando una de las fallas no da lugar a otra falla (Dobson & Carreras, 2010; Dobson, Kim, & Wierzbicki, 2010; Dobson, Wierzbicki, Carreras, Lynch, & Newman, 2006).

También forma parte del modelo estable el análisis basado en flujos de potencia que considera contingencias basado en criterios como es el N-1, N-2, N-x.

Para la simulación de contingencias, fallas en cascada y blackouts, se han desarrollado herramientas de análisis como el TRELSS (Transmission Reliability Evaluation of Large-Scale Systems) (Papic, 2011; Zhao, et al., 2009) que es usada para identificar las fallas en cascada a partir de la simulación de determinadas contingencias, como la salida de unidades generadoras, la salida de líneas de transmisión, mantenimientos, la actuación del sistema de protección y el impacto de las condiciones ambientales adversas. Otro modelo es el “Oak Ridge PSERC Alaska” (OPA) que considera un caso base y a partir de este se inician una serie de fallas para lo que se considera la salida aleatoria de diferentes líneas de transmisión. (Carreras, Lynch, Dobson, & Newman, 2002; Dobson & Carreras, 2007; Nedic, Dobson, Kirschen, Carreras, & Lynch, 2005). También se ha desarrollado el modelo “Manchester” que apoyado en la simulación de Montecarlo ha sido usado para evaluar el costo esperado del blackout y para determinar una escala relativa de referencia del stress del sistema que da cuenta de la carga del mismo y el impacto de la falla (W. Ansi, Yi, Guangyu, & Pei, 2011; Dobson & Carreras, 2007). Finalmente, en este grupo se encuentra el modelo “Hidden failures” que analiza la problemática del sistema eléctrico basado en las fallas ocultas que permanecen latentes en condiciones normales de operación y son expuestas al producirse contingencias en el sistema. Estas fallas ocultas son atribuibles a los sistemas de protección y ocurren en momentos de mucho estrés de la operación del sistema (Tamronglak, Horowitz, Phadke, & Thorp, 1996).

Algunos autores también se han centrado en el análisis de la estructura del sistema, como es el caso del método “Small-World Network” (J. Watts, 2002) que es propuesto para identificar las líneas vulnerables en el sistema. El modelo asume que un nodo fallará si hay la posibilidad de falla del nodo vecino. A partir de las fallas iniciales y si estas se propagan el proceso se convertirá en fallas en cascada. Por su parte, el método “Scale-Free Network” describe la estructura de las redes en función de la topología física de las mismas, indica que los nodos de dichas redes están altamente conectados (hubs) y muestra como esta concentración de nodos impacta en la confiabilidad y seguridad del sistema (Hines & Blumsack, 2008). Una de las características de este modelo es que sigue la distribución de la ley de potencia, en el que pocos nodos tienen un gran número de enlaces y que muchos nodos tienen pocos enlaces. Otra propiedad identificada por este método es que los

sistemas son muy resistentes a fallas individuales pero extremadamente vulnerables a fallas coordinadas. Finalmente, se tiene el método “Betweenness Centrality” que evalúa la carga en los nodos y líneas de una red, supone que la comunicación entre dos nodos se realiza a través de la ruta más corta, lo cual no es cierto para redes eléctricas, para superar esta limitación, los autores introducen la capacidad de diversificación. Este método ha sido mejorado posteriormente con la introducción de un índice de eficiencia que da cuenta de la vulnerabilidad del componente (Wang, Ansi, Yi, Guangyu, & Pei; Motter & Lai, 2002).

Otros tópicos, como el precio y el riesgo también han sido investigados con relación al tema de fallas. En el caso de precios, el trabajo de investigación realizado por Watts (D. Watts & Ren, 2007), expone aspectos relaciones con el rol de los precios spot en el mercado eléctrico y los modelos de fallas en cascada, desarrollan su investigación en base al modelo OPA y la interacción con el mercado (D. Watts & Ren, 2007). En el caso de las fallas y el riesgo existen trabajos previos en los que se expone la evaluación del riesgo de blackouts y fallas en cascada, desarrollo de metodologías y herramientas para el tratamiento del riesgo de fallas en cascada (Vaiman, et al., 2011b).

5. MARCO TEÓRICO

En este capítulo inicialmente se realiza la descripción de características inherentes al enfoque tradicional y al enfoque de la teoría de la complejidad. Posteriormente, se abordan los principales conceptos que dan fundamento a esta investigación, siendo esenciales para la comprensión y posterior aplicación al Sistema Interconectado Nacional de Bolivia. Los conceptos que se exponen son: Ley de potencia (power law), criticalidad auto-organizada, coeficiente de Hurst y riesgo (no linealidad).

5.1 Enfoque Tradicional vs Nuevo Enfoque

Los investigadores del área de planificación han realizado muchos supuestos y simplificaciones y se han concentrado en la búsqueda de métodos para encontrar una solución al problema de optimización, formas de incentivo para las inversiones e introducción de temas ambientales. Si bien la investigación de esos tópicos sigue siendo interesante y necesaria, también es preciso introducir nuevos conceptos – bien establecidos en otras áreas - que permitan considerar el impacto de acontecimientos de poca probabilidad de ocurrencia pero de gran impacto y que nos permitan ver el sistema de manera más real, aunque sea un poco más complicada. Adicionalmente, los planificadores para introducir la incertidumbre de parámetros como la hidrología, la demanda, las fallas y otros, presuponen distribuciones normales, sin embargo, el enfoque tradicional no permite considerar el riesgo asociado al impacto de eventos mayores como los blackouts. Gran parte de los estudios de planificación consideran que la distribución normal es dominante y que representa perfectamente a los eventos de toda magnitud.

Bajo el marco teórico de la complejidad se puede analizar el fenómeno de eventos de alto impacto y baja probabilidad, en contraste con los métodos utilizados en la planificación clásica.

Los modelos tradicionales presentan una visión simplificada del funcionamiento de un sistema y se basan en supuestos que no sólo no tienen fundamento empírico, sino que estos modelos no son capaces de explicar eventos que ocurren con una frecuencia muchas veces superior a lo estimado por dicho modelo. Adicionalmente, a pesar de una baja probabilidad, se presentan eventos de gran magnitud lo que representa una distribución de

cola pesada, que bajo el modelo tradicional no es considerado, por tanto, es conveniente trabajar con distribuciones que reflejen estos hechos (Casparri & Moreno, 2004).

Bajo el enfoque tradicional, varios de los análisis y mediciones realizadas en diferentes áreas tienen un tamaño típico o una escala, por ejemplo, las estaturas de las personas que giran en torno a un valor medio. Sin embargo, no todas las cosas que medimos giran alrededor de un valor típico. Muchas veces, el rango entre el valor mínimo y máximo tiene diferencias de varios órdenes de magnitud. Un clásico ejemplo es la magnitud de los terremotos en el que hay menores terremotos que suceden con alta frecuencia y mayores terremotos con menor frecuencia. Otro ejemplo es la distribución de población mostrada a continuación en el que se observa que el histograma está sesgado a la derecha, lo que significa que si bien el grueso de la distribución lo conforman ciudades de pequeño tamaño, hay un pequeño número de ciudades con un alto número de habitantes. Como se observa este valor dista mucho del valor típico y es lo que produce la cola a la derecha del histograma (Figura 5-1) (Newman, 2004).

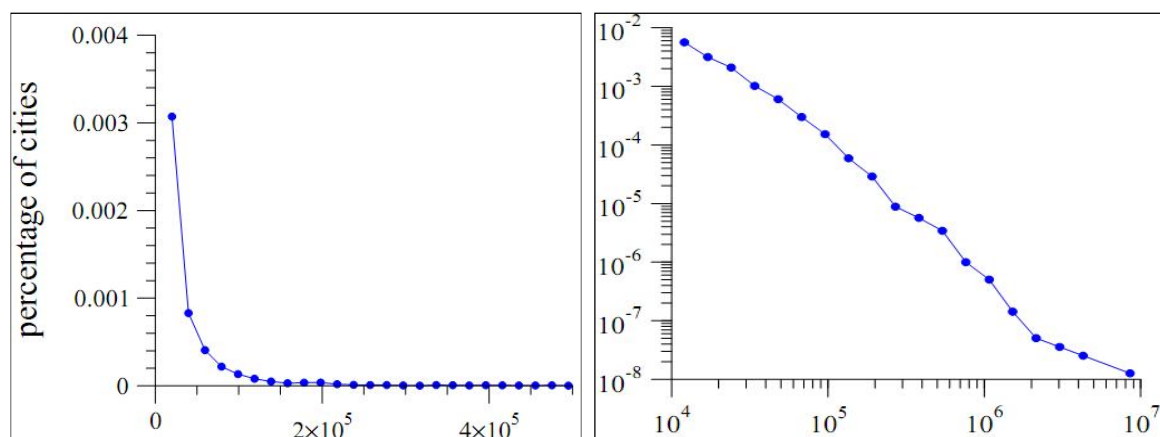


Figura 5-1. Distribución de población (Fuente: Newman, 2004)

En el análisis tradicional se considera distribuciones que siguen las pautas estadísticas normales o gaussianas, es decir, la de variables aleatorias continuas, cuya representación gráfica es la siguiente: (Calduch, 1998)

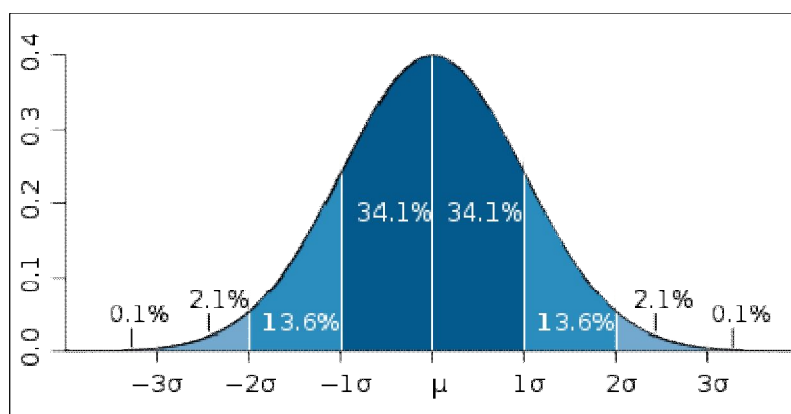


Figura 5-2: Curva de distribución normal (Fuente: Calduch)

Adicionalmente, los hechos reales (terremotos de gran magnitud, fallas nucleares, etc.) muestran que estos eventos de alto impacto no se adecuan, ni son considerados por los modelos tradicionales por la baja probabilidad de ocurrencia. Esta situación abre las puertas a nuevos modelos y herramientas de análisis, entre ellos la teoría de la complejidad y la geometría fractal que permiten acercar la teoría a la realidad (Casparri & Moreno, 2004).

En el nuevo enfoque a través de la teoría de la complejidad, la relación matemática que vincula la frecuencia de un suceso y el tamaño de dicho suceso sigue una distribución de ley de potencia cuando la tasa de variación de la frecuencia del suceso es mucho mayor que la tasa de variación de su tamaño (Calduch, 1998). Cuando se presenta la distribución de ley de potencia, hay también independencia de escala (Scale-free networks), es decir, no hay una medida típica ni valores promedios que describan el conjunto de la red. Entonces, la red libre de escala obedece la ley de escala característica de los sistemas que se auto-organizan (Reynoso, 2008). La red de escala libre tiene varias propiedades, una de ellas es la robustez, es decir, se puede destruir el 80% de los nodos y el resto sigue funcionando. Otra característica es la vulnerabilidad a ataques selectivos, esto se refiere a que una eliminación de 5 a 10% de los hubs (pocos nodos altamente conectados en relación con el tamaño de la red) podría provocar el colapso del sistema. Respecto a la conectividad en la red libre, la misma se caracteriza por superar varias veces el promedio, lo que no sucede en una red aleatoria. Dada la particularidad de este tipo de red, el enfoque tradicional no

necesariamente es adecuado para lidiar con particularidades que presentan distribuciones que no son normales (Reynoso, 2008).

El análisis tradicional no considera que hay nodos altamente conglomerados o clusters jerárquicos y vulnerables, (Reynoso, 2008) en cambio el sistema eléctrico real presenta estas características, por tanto, para su total comprensión y modelación es necesario considerarlos y evaluar su impacto.

En ese sentido la teoría de la complejidad surge como una opción para el análisis del sistema eléctrico de manera de complementar el análisis tradicional. Esta teoría brinda herramientas para caracterizar el sistema eléctrico, modelar y posteriormente realizar una gestión y administración del riesgo.

5.2 Teoría de la Complejidad

La teoría de la complejidad data del siglo XX, en sus inicios no tuvo gran repercusión, de hecho, bajo el paradigma científico clásico hubo una negación e invisibilidad. Los hechos acontecidos a lo largo de la historia, esto es eventos de gran impacto que eran considerados de baja probabilidad, en los hechos reales ocurrieron con mayor frecuencia de lo pensado, en ese sentido, la teoría de la complejidad tuvo un reconocimiento parcial y posteriormente fue considerado como objeto explícito y sistemático del pensamiento científico. En la siguiente figura se observa los hitos más importantes relacionados con la historia de la teoría de la complejidad. Esta teoría, a través de sus diversas características ha sido ampliamente aplicada en otras áreas como biología, física, economía, etc. (Rodríguez, 2010).

Respecto al aspecto académico, inicialmente solo se consideraba esta teoría a través de una cátedra, sin embargo, dado los acontecimientos reales ocurridos y la necesidad de analizar y mitigar los eventos de baja probabilidad pero alto impacto, surgieron grupos de estudio, centros, institutos de investigación, escuelas y otros y a nivel mundial (Rodríguez, 2010).

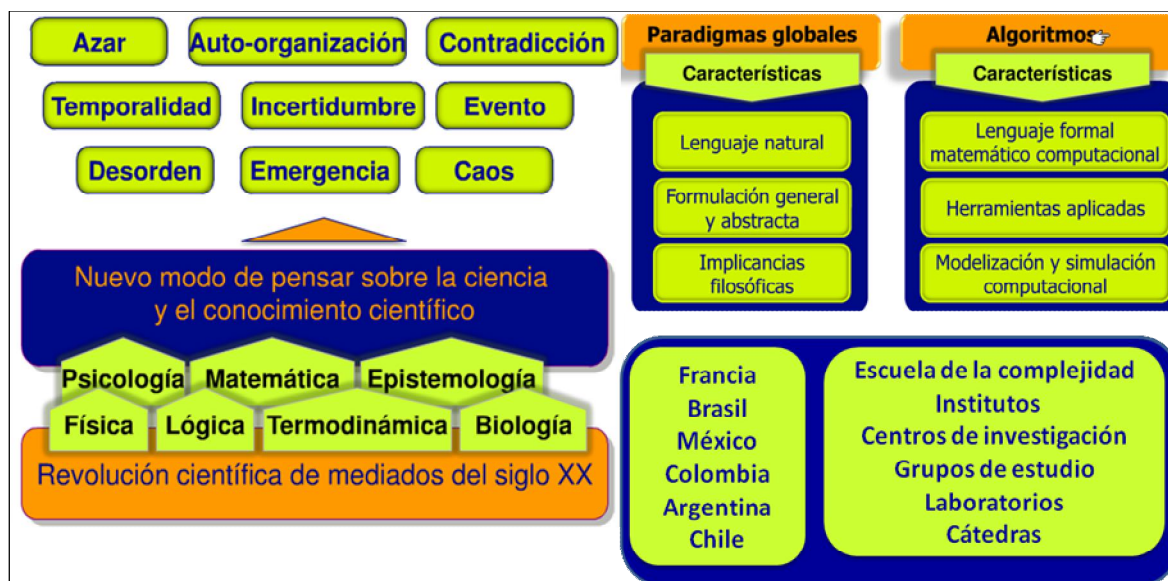


Figura 5-3: Mapeo de la historia de la teoría de la complejidad

Varios estudios desarrollados en otras áreas toman en cuenta conceptos de la teoría moderna como son los fractales, teoría del caos, teoría de la complejidad y otros que complementan y/o se oponen a los conceptos tradicionales que consideran eficiencia y normalidad de la distribución de los diferentes parámetros pertinentes en cada área. Con esta teoría se espera mayor precisión en el modelaje de las turbulencias, discontinuidades, fenómenos improbables y otros que realmente caracterizan los acontecimientos reales (Silva, Athayde, & Vieira, 2006).

La teoría de la complejidad muestra que existen ciertos principios válidos, teorías y herramientas de análisis creadas en una disciplina que pueden ser aplicadas convenientemente en otra área del conocimiento. El objetivo de la teoría de la complejidad y la auto-organización es entender la fuente y las características de las estructuras y la dinámica temporal en sistemas que se exhiben de manera natural en una gran variedad de fenómenos. Los sistemas son considerados complejos si son abiertos, si presentan comportamiento aleatorio, si presentan geometría fractal, si presentan varios estados de equilibrio, flexibilidad/robustez, interacción entre sus elementos. En la siguiente figura se muestra esquemáticamente las principales características de la teoría de la complejidad, siendo la idea fundamental la de superar la visión tradicional con resultados limitados y extenderlos a la visión de la vida real y considerando la ocurrencia de todos los eventos sin

discriminar aquellos que pueden ser considerados como valores extremos. A continuación se describen estas principales características:



Figura 5-4: Características de la teoría de complejidad

Experiencia real, la teoría de la complejidad considera hechos de la vida real sin hacer simplificaciones, no discrimina eventos de baja probabilidad de ocurrencia (Maldonado, 2009).

Unidades interactúan, las unidades independientes no actúan de forma aislada, como es considerado en el enfoque tradicional, más bien interactúan con sus vecinos (Maldonado, 2009).

Mecanismo de realimentación, bajo el enfoque de la teoría de complejidad cada estado está determinado por sus estados anteriores y un pequeño cambio en valores iniciales tienen grandes efectos en el resultado del sistema (Gálvez, 2005; Maldonado, 2009).

Causa -> efecto, explican los posibles mecanismos que generan distribuciones como la ley de potencia, que es el resultado de la auto-organización o patrones emergentes que se dan en procesos complejos en los que los agentes actúan en un entorno de incertidumbre y su interacción produce un comportamiento colectivo que se representa a través de una regularidad estadística (Maldonado, 2009).

Estas características aplicadas a los sistemas eléctricos se exponen en la figura siguiente. Bajo la característica de experiencia real, se considera el análisis no solo de las fallas menores sino también de los blackouts. Respecto a la interacción de las unidades se refiere

a que los diferentes equipos del sistema eléctrico (generadores, transformadores, etc.) están conectados al sistema y no operan de forma aislada. Con relación al mecanismo de realimentación se hace analogía con una falla inicial, que en un primer nivel es un evento inicial, pero en un segundo nivel, puede ser la consecuencia del evento ocurrido en el primer nivel o si la falla no es despejada adecuadamente, esta puede iniciar una nueva falla y dar lugar a las fallas en cascada. La característica de causa efecto se refiere a que los blackouts se presentan con mayor frecuencia que lo considerado normalmente, dando lugar a los valores extremos y mayor concentración de eventos menores.

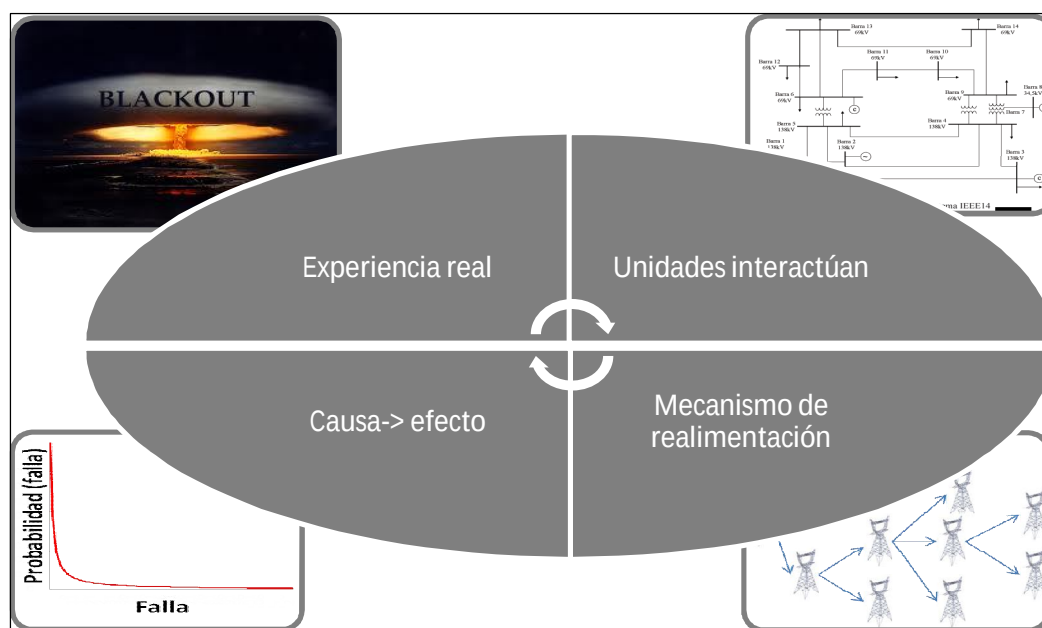


Figura 5-5: Características de la teoría de complejidad. Aplicación al sistema eléctrico

Las propiedades de los sistemas complejos, mostrados esquemáticamente en la siguiente figura, son la criticalidad auto-organizada, la no linealidad y memoria de largo plazo (en este caso dado por el coeficiente de Hurst). Estos conceptos son explicados a continuación:

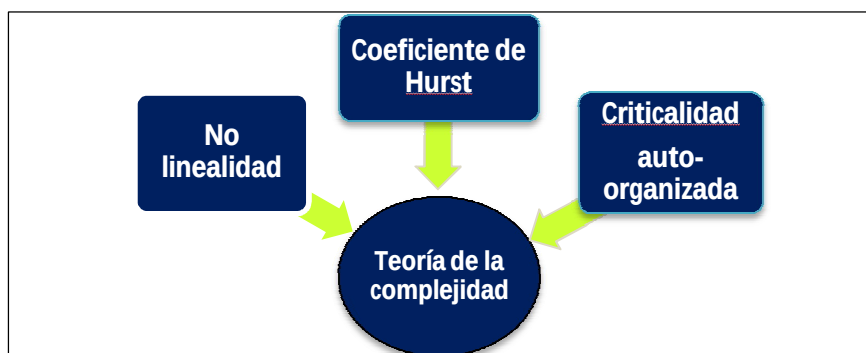


Figura 5-6: Propiedades de la teoría de complejidad

5.3 Criticalidad Auto-organizada

El concepto de criticalidad auto-organizada (SOC por las siglas en inglés de Self-Organized Criticality) fue introducido por Per Bak, Chao Tang y Kurt Wiesenfield en el artículo de *Physical Review Letters* en 1987 para explicar el patrón de comportamiento de diversos sistemas o fenómenos complejos existentes en la naturaleza que evolucionan hacia estados críticos, en el que si se producen pequeñas perturbaciones sin intervención de ningún agente externo, pueden ocasionar avalanchas de diversa intensidad y obedecen a una ley de potencia, es decir, que su magnitud es inversamente proporcional a su frecuencia (García, Jiménez, & Ayuso, 2008; Tercero, 2009). Estos sistemas críticamente auto-organizados alcanzan su estado estable mediante fluctuaciones temporales (García, et al., 2008).

Un sistema auto-organizada se refiere a la tendencia de los grandes sistemas disipativos a dirigirse ellos mismos a un estado crítico que es un atractor para el mismo, genera señales que son auto-similares, ya que no hay una escala preferida (Cardona, 2007). En este sistema se establece una única condición para el acontecimiento de un evento mayor que dependerá de los acontecimientos previos, los cuales ocurrirán siempre que sea alcanzada la condición crítica establecida para el sistema. Es decir, el sistema sin una causa externa, cuando se encuentra próximo a sus condiciones límites, puede evolucionar espontáneamente hacia una condición crítica (Carneiro & Charret, 2005).

En esencia, esta teoría postula que las respuestas del sistema a perturbaciones pueden variar desde cambios simples y aislados hasta cambios que involucren a todo el sistema, no hay longitud característica de la cadena en la duración, no hay un número o tamaño

característico de las actividades en cuestión y no hay una distancia característica sobre la que tiene lugar la respuesta. La duración y el tamaño de las actividades envueltas en tales respuestas siguen la ley de potencia (Tercero, 2009).

Esta teoría es explicada a través de la metáfora de la pila de arena a la que se le va agregando granos de arena (Tercero, 2009). Esta metáfora es una ilustración del SOC en un sistema complejo en el que se establece una única condición para el acontecimiento de una avalancha que ocurrirá siempre que la condición crítica sea alcanzada (Carneiro & Charret, 2005). En esta metáfora los granos de arena se dejan caer uno a uno sobre una pila de arena, la que inicialmente está baja y a medida que se dejan caer más granos de arena la inclinación de la pila de arena comienza a aumentar ocurriendo algunos deslizamientos, que son apenas pequeños movimientos de granos de arena, que son debidos a la interacción de un grano de arena con sus vecinos. A medida que la altura de la pila de arena alcanza dimensiones proporcionalmente mayores a su base ocurren deslizamientos mayores que involucran todo el sistema y no solo a sus vecinos, es decir, cuando el sistema alcanza un estado estacionario donde la pila pasa a tener una inclinación constante los granos de arena adicionales se caen de la pila y son capaces de provocar una avalancha. El sistema se encuentra en estado crítico que es caracterizado por la incertidumbre porque no es posible precisar cuál será el tamaño o instante en el que las avalanchas ocurrirán. Esto significa que cuando ocurren deslizamientos locales, pueden o no ocurrir avalanchas que involucren todo el sistema. Las avalanchas ocurren con la finalidad de disminuir las pendientes locales cada vez que se vuelven empinadas o alcanzan el estado crítico. Entonces, las avalanchas son claramente necesarias con el fin de relajar la pila de arena, pero como se mencionó, se tiene la incertidumbre en cuanto al tamaño e instante de las avalanchas (Carneiro & Charret, 2005).

Las características de un SOC:

- Umbral crítico (pendiente crítica).
- Avalanchas que se propagan.
- Transporte a muchas escalas, sin preferencia para una escala (tamaño) de evento en particular.

La teoría de la complejidad, a través de la característica del SOC proporciona pautas para explicar:

- Propagación de fallas (mediante avalanchas).
- Escalado de los parámetros de la falla con el tamaño del sistema (fallas de toda magnitud hasta el blackout).

En un sistema que no es complejo, al ocurrir una perturbación solo ocurren pequeñas reacciones locales y la probabilidad de que ocurra una respuesta intensa a una pequeña perturbación es comparable a la probabilidad de que no ocurra nada, en cambio, en sistemas complejos caracterizados por el SOC, la probabilidad de avalanchas no puede ser despreciada frente a pequeñas perturbaciones (Carneiro & Charret, 2005). Para un mejor entendimiento, a continuación se expone esquemáticamente la criticalidad auto-organizada, en el que se observa que ante una evento inicial, este puede influir o no en el sistema, si influye y se propaga el sistema alcanzará un estado crítico y para des-estresarse, al estar auto-organizado, se relaja buscando un nuevo equilibrio.



Figura 5-7: Esquema de la Criticalidad auto-organizada.

Haciendo una analogía para el sistema eléctrico, al presentarse una falla inicial, si esta es despejada adecuadamente la falla no se propaga. Si la falla se propaga, esta puede dar lugar a nuevas fallas ocasionadas por la sobrecarga de los componentes que conforman el sistema y a la vez podría dar lugar a las fallas en cascada. Estos eventos pueden llevar al sistema a un estado crítico de estrés, dando lugar a un nuevo estado que puede ser la operación en islas del sistema o el colapso total o blackout. Esta analogía es mostrada esquemáticamente en la siguiente figura:



Figura 5-8: Esquema de la Criticalidad auto-organizada. Aplicación al sistema eléctrico

Esta propiedad de la criticalidad auto-organizada se ha utilizado para explicar, entre otras cosas, el fenómeno del ruido, la distribución de la magnitud de los terremotos, incendios forestales, el ordenamiento de las ciudades de acuerdo a su tamaño, los cambios en la velocidad rotacional de las estrellas, los eventos de extinción biológica, los precios de los productos básicos en el mercado, la incidencia diaria de infartos cardíacos y las caídas de la bolsa de valores entre otros. En términos generales, la criticalidad auto-organizada ofrece un nuevo enfoque que permite la caracterización de las fallas en sistemas eléctricos.

En palabras sencillas, la Criticalidad Auto-organizada incluye a dos fenómenos físicos: la presencia de un estado crítico y la auto-organización. Estos fenómenos son descritos a continuación.

5.3.1 Auto-Organización

Se entiende como auto-organización a la capacidad de un sistema de modificar su estructura o patrón sin influencia externa, evoluciona en forma organizada en ausencia de limitaciones externas y presenta las siguientes características (Tercero, 2009):

- Ausencia de un control centralizado (competencia).
- Operación dinámica (evolución en el tiempo).
- Fluctuaciones (búsqueda a través de opciones).
- Ruptura de simetría (pérdida de libertad).

- Inestabilidad (elecciones auto-reforzantes).
- Equilibrio múltiple (atractores posibles).
- Criticalidad (umbral para cambios de fase efectivos).
- Orden global (emergencia desde interacciones locales).
- Disipación (uso y exportación de energía).
- Redundancia (insensible al daño).
- Auto-mantenimiento (reparación y reemplazo de partes).
- Adaptación (estabilidad a variaciones externas).
- Complejidad (parámetros múltiples).
- Jerarquías (niveles múltiples auto-organizados).

5.3.2 Criticalidad

Se denomina criticalidad o criticidad al estado de un sistema complejo en el que una pequeña perturbación puede producir grandes avalanchas que afectan a todo el sistema. En la metáfora de la pila de arena, conforme este crece se presentan deslizamientos y cuando alcanza su estado crítico se producen avalanchas (Tercero, 2009).

El término auto-organizado está representado por la relación de ley de potencia que expresa la relación entre el tamaño y la frecuencia con que se presentan las avalanchas debido al incremento aleatorio de las variables en estudio.

5.3.3 Aplicación

La teoría del SOC ha sido utilizada para caracterizar la actividad de los terremotos mediante los parámetros de magnitud del evento y tiempo entre terremotos. Así, la cantidad de terremotos de una determinada magnitud sigue la distribución conocida como la ley de potencia (García, et al., 2008; Rivas & Elberg, 2008), que aparece como línea recta al representarla en escala doblemente logarítmica (García, et al., 2008).

También la teoría del SOC ha sido aplicada para describir el comportamiento de la lluvia y sequía, debido a que la energía proporcionada por el sol para la evaporación del agua se

libera repentinamente durante un evento de lluvia. Al analizar los datos históricos de lluvia obtuvieron que tanto la distribución de magnitud de eventos de precipitación así como la duración de los mismos siguen la ley de potencia (García, et al., 2008).

5.4 Ley de Potencia (Power law)

La ley de potencia se especifica como la probabilidad de que un evento tenga un mayor tamaño o igual a un cierto valor y además incluye valores extremos (cola larga). La ley de la potencia es una forma de auto-organización de los sistemas complejos y una característica de la criticalidad auto-organizada, se presenta cuando una gran cantidad de elementos interaccionan entre sí para dar lugar a uno de nivel superior (Aljure, Gallego, & Jiménez, 2008; Gálvez, 2005). Este término es usado para describir eventos en los cuales una variable aleatoria alcanza valores altos con poca frecuencia, mientras que los valores medianos o bajos son mucho más comunes. Por ejemplo (Aljure, et al., 2008):

- El 80% de las ventas viene del 20% de los clientes.
- El 80% de los crímenes los comete el 20% de los criminales.
- Con referencia a la escala de Richter, son pocos los grandes terremotos, pero muy frecuentes los movimientos telúricos de baja intensidad.
- Hay menor cantidad de personas con mayores ingresos y mayor cantidad de personas con ingresos menores.
- Hay pocas ciudades grandes y muchos pueblos pequeños, en relación con el número de habitantes.
- Hay pocas palabras que se utilizan con mucha frecuencia en un texto, mientras otras se usan pocas veces.

La ley de potencia describe invariancia de escala en muchos fenómenos dispersos y se encuentra relacionado a la autosimilitud y auto-organización que es un rasgo característico de las transiciones de fase en las proximidades de un punto crítico (Reynoso, 2008). En términos de incertidumbre, expresa que la probabilidad de ocurrencia de pequeños eventos es relativamente alta, mientras que la probabilidad de ocurrencia de grandes eventos es relativamente baja (Figura 5-9) (Adamic, 2000; Gleria, Matsushita, & Da Silva, 2004).

Es importante la determinación de la ley de potencia porque permite identificar el grado de desequilibrio o desigualdad en el sistema.

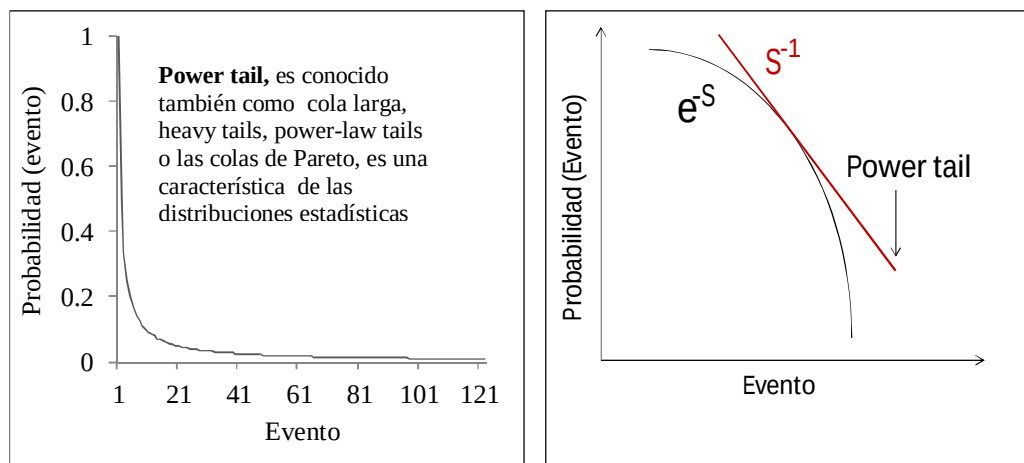


Figura 5-9 Distribución de la ley de potencia (power law)

Ergo, Zipf y Pareto realizaron estudios en diferentes áreas para explicar el comportamiento de diferentes aspectos como el nivel de ingresos, la ocurrencia de los terremotos, la frecuencia del uso de palabras en diferentes textos y otros cuyas distribuciones son mostradas a continuación:

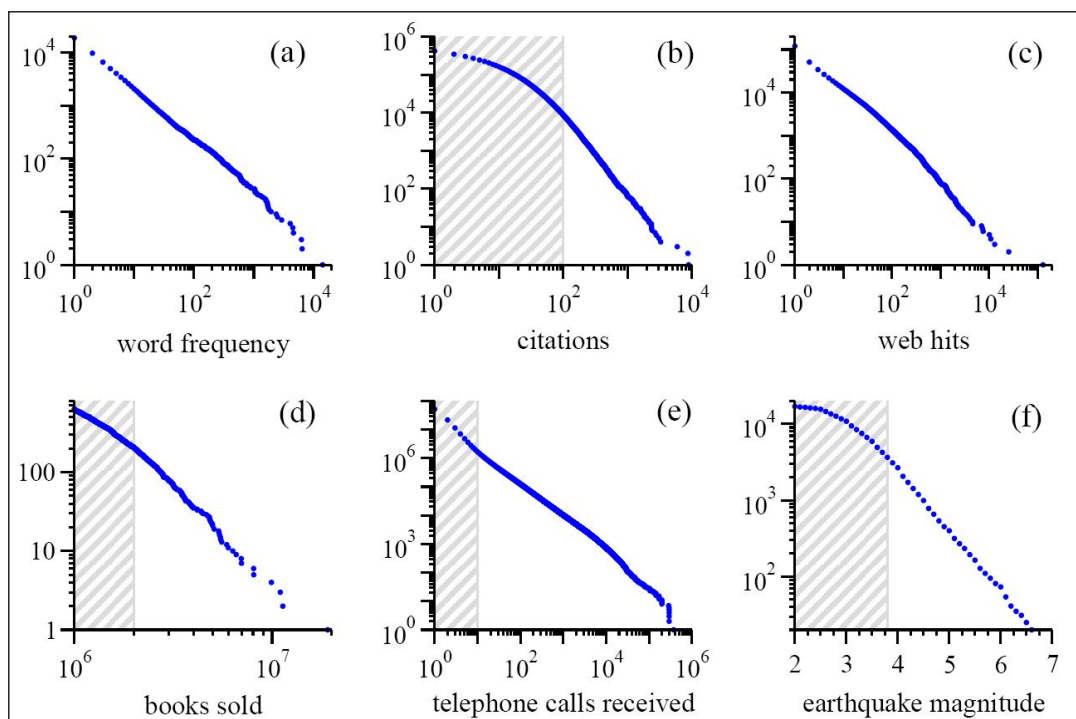


Figura 5-10: Ejemplos que muestran la distribución de la ley de potencia

El ejemplo propuesto y analizado por Pareto, que representa la ley de potencia, afirma que en todos los países y en todos los tiempos, una fracción pequeña de la sociedad controla una porción alta de la riqueza (Aljure, et al., 2008). Otro ejemplo de la ley de potencia es el modelo de la pila de arena, en el que se tiene que una avalancha involucra mil granos de arena, diez avalanchas involucran cien granos de arena y cien avalanchas involucran diez granos de arena (Tercero, 2009).

La metáfora del “evento de cisnes negros” expresada por Taleb hace referencia a la baja probabilidad de los resultados de alto impacto que por definición son imprevisibles pero inevitables.

En sistemas eléctricos, esta ley representa la alta probabilidad de fallas menores y la baja probabilidad de blackouts.

5.4.1 Aplicación

La ley de potencia ya ha sido implementada en otras áreas para caracterizar el comportamiento de eventos atípicos como el estudio de la ocurrencia e impacto de los terremotos, distribución del nivel de riqueza de las personas, en la que una mayor población tiene una riqueza mínima y una mínima población concentra una riqueza mayor (MacGill, 2007). Otro ejemplo es el tamaño de las ciudades de un país, en el que solo una de las ciudades concentra la mayor cantidad de la población (ej. Santiago cerca de ocho millones de habitantes) y varias ciudades tendrán una menor población (ej. Aysén cerca de cien mil habitantes)(INE, 2011). También, la ley de potencia ha sido considerada en el análisis del comportamiento de los accidentes nucleares, en el que por ejemplo el accidente de Chernobyl es correspondiente con una probabilidad menor al 0.00001 (Figura 5-11)

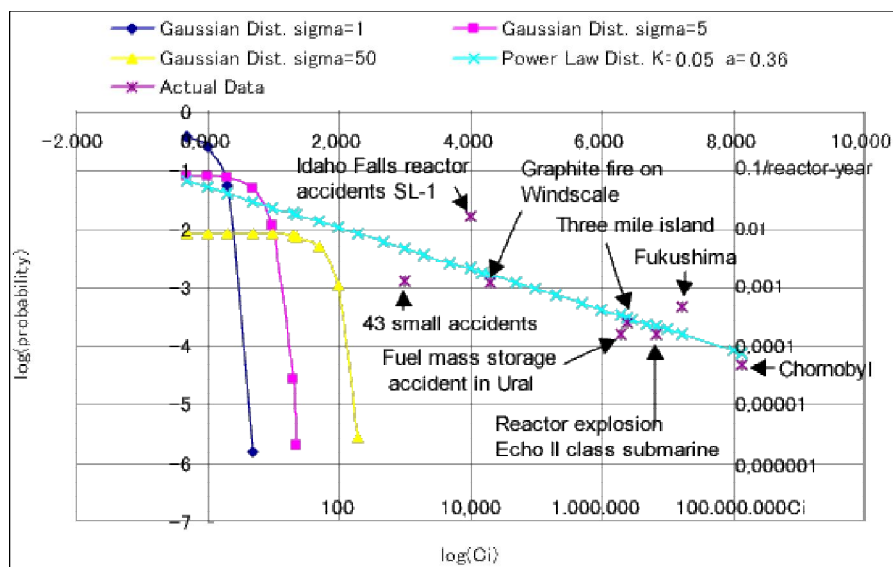


Figura 5-11: Distribución de la ley de potencia de accidentes nucleares Fuente: (Asahi, 2011)

Los estudios sobre resultados electorales muestran que la distribución de los datos corresponde a la ley de potencia, que sugiere que la lógica detrás de esta distribución es un proceso multiplicativo en el cual el voto del elector por un cierto candidato está gobernado por el producto de probabilidades (Enciso, 2008).

En ciencias económicas se han encontrado patrones de funcionamiento para una buena cantidad de fenómenos económicos, en particular los procesos de agregación macroeconómica, la distribución del ingreso y la riqueza, el tamaño de las ciudades y de las empresas, así como la distribución de variables financieras, como los retornos de activos y los volúmenes de transacción bursátiles están condicionados por la ley de potencia, en particular, la llamada ley de Zipf. La ley de potencia también se presenta en procesos de industrialización en el que existe un sesgo que expresa la coexistencia de pocas actividades productivas que concentran la mayor parte de los empleados, mientras que un gran número de actividades agrupa una menor cantidad de trabajadores (Benita & Martínez, 2011).

En el área económica, el coeficiente Hurst fue utilizado para validar el comportamiento caótico en las bolsas de comercio de varios países como Argentina, Brasil, Canadá, Chile, Estados Unidos, Perú y México. Los resultados que obtuvieron apoyan la hipótesis de que los mercados bursátiles americanos se comportan de forma caótica,

en contra de la hipótesis de mercados eficientes y la hipótesis de aleatoriedad. El coeficiente de Hurst que obtuvieron en promedio fue de 0,75 que evidencia memoria de largo plazo en los índices bursátiles americanos (Espinosa, Parisi, & Parisi, 2005). Adicionalmente, algunos estudios utilizaron el coeficiente de Hurst para mostrar la dependencia de largo plazo en las series de precios de los activos financieros (Espinosa, et al., 2005).

En biología varios fenómenos son condicionados por la ley de potencia. Así existen muchos géneros conformados por pocas especies, mientras que pocos géneros tienen muchas especies.

5.5 Coeficiente de Hurst

El coeficiente de Hurst (H) permite analizar la naturaleza de una serie de tiempo e indica si la misma está condicionada a la memoria de largo plazo. La presencia de memoria permite identificar si el presente es el resultado de hechos anteriores, es decir, si existe dependencia entre datos¹ (Sierra, 2007). Al determinar el coeficiente de Hurst se obtiene la medida de correlación, que indica el impacto que tiene el presente en el futuro (y el pasado en el presente) (Casparri & Moreno, 2004).

La evaluación del coeficiente de Hurst ayuda en el reconocimiento y caracterización de la dinámica compleja en series de tiempo del sistema y contribuye en la descripción cualitativa de conducta de dicho sistema (Gálvez, 2005).

Los valores de este coeficiente pueden ser interpretados de la siguiente manera (Freitas, Sand, Pereira, & Da Silva, 2010):

- Entre el rango $0.5 < H < 1$, implica series de tiempo persistentes o de memoria de largo plazo. Teóricamente lo que sucede hoy impactará en el futuro.
- Entre el rango $0 < H < 0.5$, implica anti-persistencia en la serie de tiempo o memoria de corto plazo.
- Si $H = 0.5$ la serie representa un camino aleatorio o independiente (random walk).

¹ El análisis y determinación del coeficiente Hurst generó mucho interés en diferentes ámbitos especialmente en el financiero.

Inicialmente el coeficiente de Hurst fue desarrollado para analizar las corrientes del río Nilo a través del estudio del comportamiento de las series temporales del caudal. Para la determinación de este coeficiente se desarrolló el método estadístico denominado “rango re-escalado” (Sabogal & Vega, 2006). Posteriormente se desarrollaron otros métodos que son los siguientes:

- Método de valor absoluto.
- Método de la varianza.
- Método Rango Re-escalado (R/S).
- Método del periodograma.
- Estimado Whittle.
- Método de la varianza de los residuos.
- Método de Abry – Veitch.

En sistemas eléctricos este coeficiente puede contribuir en el análisis de las fallas en cascada y blackouts ya que permite determinar la existencia de memoria de largo plazo.

5.5.1 Método Re-escalado (R/S)

El método re-escalado R/S proviene de la teoría de fractales y tiene como característica la auto-similitud, que significa que todas sus partes, desde la más pequeña hasta la global, tienen una relación estadística y se repiten infinitamente. El R/S es un método estadístico utilizado para evaluar la ocurrencia de eventos poco comunes, considera que los componentes de las series de tiempo no son independientes. Este método está generalizado en la siguiente ecuación (Sierra, 2007):

$$(R/S)_n = cn^H \quad (5.1)$$

Donde (R/S) se conoce como el estadístico rango re-escalado, tiene media cero y se expresa en términos de la desviación estándar, c es una constante, n es el indicador del valor de la serie de tiempo y H el coeficiente de Hurst que se determina por medio de una regresión lineal de los puntos de $\ln(R/S)_n$, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\ln(R/S)_n = \ln(c) + H \ln(n) \quad (5.2)$$

A continuación se presenta el diagrama de flujo para la determinación del coeficiente de Hurst y posteriormente se describe la metodología para el cálculo (Sabogal & Vega, 2006; Sierra, 2007; Soria & Zúñiga, 1993):

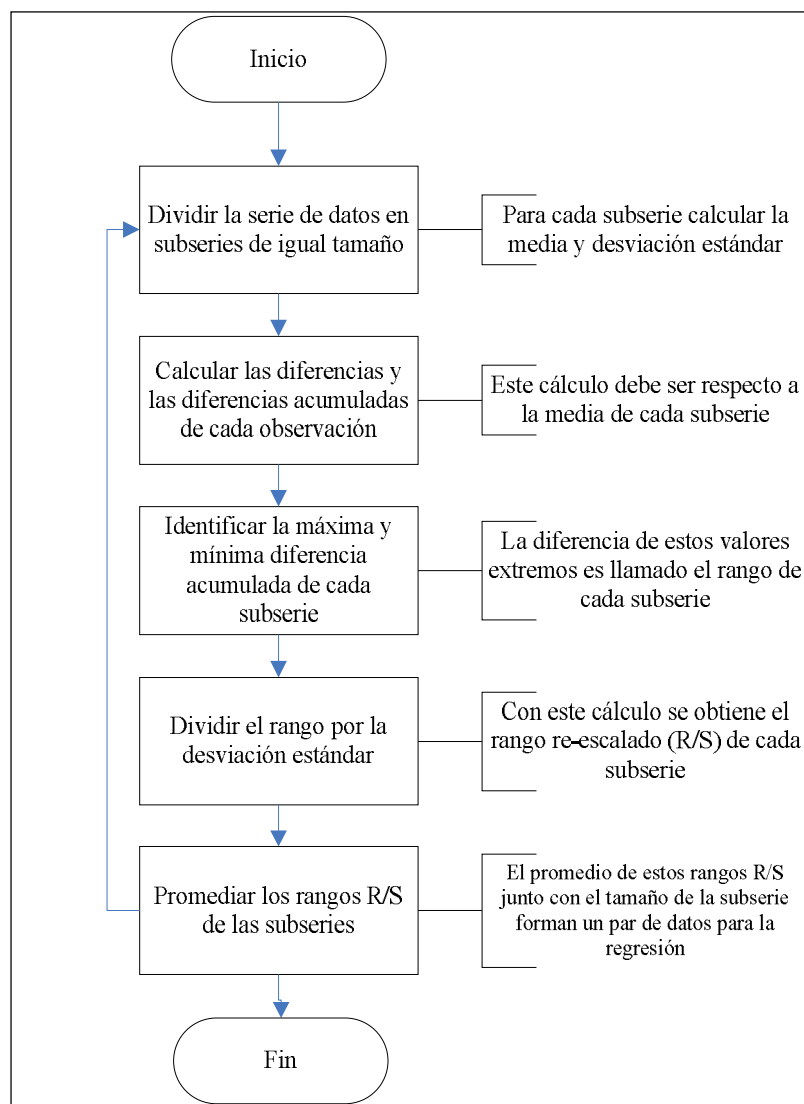


Figura 5-12: Diagrama de flujo para la determinación del coeficiente de Hurst

- 1) Se inicia con una serie de tiempo de tamaño M , posteriormente se reduce a una nueva serie de tiempo de tamaño $N = M - 1$ y cada rendimiento está definido por:

$$N_i = \ln\left(\frac{M_{i+1}}{M_i}\right), i = 1, 2, \dots, N \quad (5.3)$$

- 2) N se divide en A subperiodos (I_a , con $a = 1, 2, \dots, A$) contiguos de longitud n y cada uno de estos elementos es representado por $N_{k,a}$, tal que $k = 1, 2, \dots, n$. Para

cada I_a el valor promedio está definido por la siguiente expresión:

$$e_a = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n N_{k,a} \quad (5.4)$$

- 3) Se suman las diferencias de cada elemento $N_{k,a}$ respecto a la media e_a para cada I_a de manera de obtener una serie de tiempo acumulada ($X_{k,a}$) dada por la siguiente expresión:

$$X_{k,a} = \sum_{i=1}^k (N_{i,a} - e_a), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5.5)$$

- 4) Para cada subperiodo se define el rango R_{Ia} que es la diferencia entre el valor máximo y el mínimo dado por la siguiente expresión:

$$R_{Ia} = \text{Max}(X_{k,a}) - \text{Min}(X_{k,a}) \quad (5.6)$$

- 5) Se calcula la desviación estándar muestral S_{Ia} para cada I_a :

$$S_{Ia} = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (N_{k,a} - e_a)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.7)$$

- 6) Para cada periodo se normaliza el rango R_{Ia} dividiendo por su desviación estándar muestral S_{Ia} . El rango re-escalado es igual a R_{Ia}/S_{Ia} . Como se tiene A periodos continuos de longitud n , se toma el valor promedio de R/S para cada uno de los periodo y está dado por:

$$(R/S)_n = (1/A) \sum_{a=1}^A (R_{Ia}/S_{Ia}) \quad (5.8)$$

- 7) Finalmente aplicamos una regresión de mínimos cuadrados de $\ln (R/S)_n$ contra $\ln(n)$. La pendiente de la ecuación es la estimación del coeficiente Hurst H .²

5.5.2 Aplicación

El método estadístico de Hurst está siendo aplicado en áreas como química (estudio del comportamiento de lechos fluidizados gas - sólido) (Martínez, 2005), hidrología (crecidas de río, precipitaciones, predicción de cambios climáticos) (Amaro, Demey, & Macchiavelli, 2004), psicología (identificación ideológica) (Quezada, 2006), finanzas (valuación y aplicaciones a los derivados) (Sierra, 2007).

² Para mayor detalle consultar (Peters, 1994)

En economía el coeficiente Hurst ha sido utilizado para el análisis de series financieras, para determinar la persistencia de movimientos en mercados financieros (Casparri & Moreno, 2004).

También en el área económica el coeficiente Hurst fue utilizado para validar el comportamiento caótico en las bolsas de comercio de varios países como Argentina, Brasil, Canadá, Chile, Estados Unidos, Perú y México. Los resultados que obtuvieron apoyan la hipótesis de que los mercados bursátiles americanos se comportan de forma caótica, en contra de la hipótesis de mercados eficientes y la hipótesis de aleatoriedad. El coeficiente de Hurst que obtuvieron en promedio fue de 0,75 que evidencia memoria de largo plazo en los índices bursátiles americanos (Espinosa, et al., 2005). Adicionalmente, algunos estudios utilizaron el coeficiente de Hurst para mostrar la dependencia de largo plazo en las series de precios de los activos financieros (Espinosa, et al., 2005).

El coeficiente de Hurst ha sido utilizado para analizar si la tasa de crecimiento del rango de las variaciones de una población de passeriformes depende de las características ambientales (locales). Se determinaron coeficientes de Hurst de distintas poblaciones para identificar si están relacionados y así determinar si la variación de dicha población depende de aspectos locales (Salvador, 1994).

Este coeficiente también ha sido utilizado para el análisis de estrategias reproductivas de plantas en ambientes con distintas frecuencias y diferente intensidad de perturbación. En este estudio se determinaron las variaciones del coeficiente de Hurst con respecto a la intensidad de las perturbaciones para la especie homocárpica (todas las semillas germinan en la siguiente primavera sin dormición) y heterocárpica con una probabilidad de 0.5 (la mitad de las semillas germinan cada año) (Salvador, 1994).

Los terremotos y las réplicas sísmicas presentan una correlación temporal inesperada a largo plazo, con un comportamiento temporal persistente, esto es, un valor del coeficiente de Hurst próximo a 1. Las perturbaciones en la serie temporal de réplicas, debidas a la activación de segmentos por la sacudida principal, provocan una respuesta del sistema que no es inmediata (Pérez, 2004).

El coeficiente de Hurst también ha sido utilizado para analizar las estadísticas de trazas de video Mpeg4 con la finalidad de describir el comportamiento estadístico y determinar si dichas trazas siguen un comportamiento autosimilar y si tiene dependencia de rango largo o corto (Sabogal & Vega, 2006).

5.6 No Linealidad

Esta propiedad de no linealidad está relacionada con el análisis del riesgo que evalúa el impacto y la probabilidad de ocurrencia de eventos de toda magnitud. Este enfoque considera que no es despreciable ningún evento debido a que una falla inicial, dependiendo de las condiciones del sistema, puede propagarse y ocasionar eventos de gran magnitud y alto impacto negativo. En el momento que ocurre una falla inicial, esta tiene una alta probabilidad de ocurrencia y el blackout tiene una baja probabilidad de ocurrencia, sin embargo, a medida que esta se va propagando se incrementa la probabilidad de ocurrencia de un blackout. Este comportamiento no lineal es explicado gráficamente a continuación:

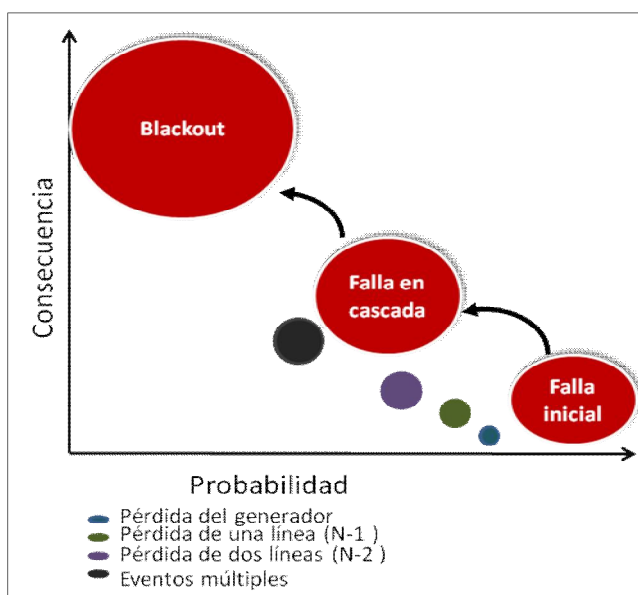


Figura 5-13: Relación no lineal causa-efecto

Por otra parte, el riesgo es un término de naturaleza probabilística, que se define como “egresos o pérdidas probables que se presenta por la incerteza de ciertos eventos no deseados o falla”. Matemáticamente, el riesgo se calcula a través de la siguiente ecuación (Yañez, 2010):

$$Riesgo(t) = Prob.Falla(t) * Impacto \quad (5.9)$$

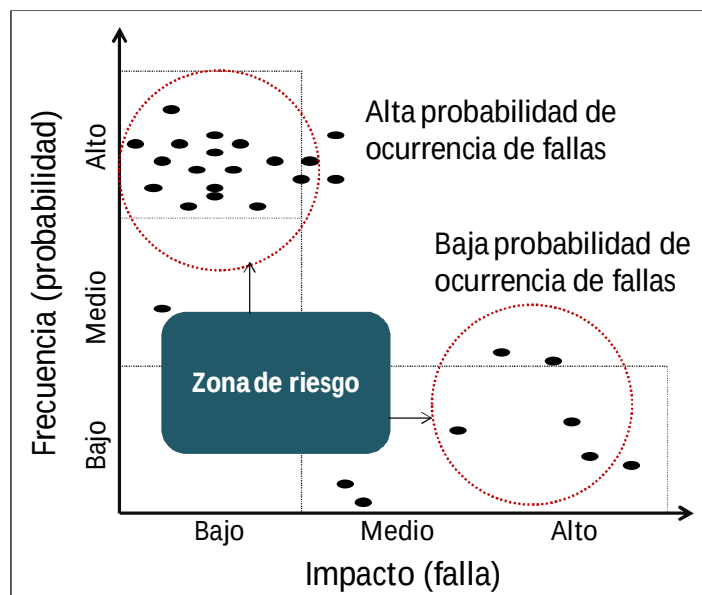


Figura 5-14. Matriz para la evaluación del riesgo (Fuente: (Yañez, 2010))

La Ecuación 5.9 permite exponer la importancia del análisis del riesgo para el diagnóstico y la toma de decisiones, debido a que el mismo combina probabilidades o frecuencias de fallas con el impacto o consecuencias. El riesgo se comporta como una balanza, que permite pesar la influencia de ambas magnitudes (probabilidad de falla y consecuencia de la Falla) en una decisión particular (Oporto, 2007; Salcedo, 2011; Yañez, 2010).

Hablar de riesgo, significa también considerar las complejidades asociadas al mismo, como son las dificultades que plantean las distribuciones de cola larga. Esta distribución considera situaciones con baja probabilidad de ocurrencia y a las que a veces se las denomina “Cisnes Negros”. Esta lógica del “Cisne Negro” hace que lo que no sabemos sea más importante que lo que sabemos, por estar causados y agravados por el hecho de ser inesperados (Salcedo, 2011).

La utilidad que plantean las distribuciones de cola larga y la teoría del valor extremo permiten la caracterización de fallas través del estudio de uno de sus componentes: los siniestros ‘punta’. La teoría del valor extremo facilita la gestión del riesgo al permitir realizar inferencia estadística sobre valores extremos de variables aleatorias y, por tanto, estimar la probabilidad de que ocurran sucesos extremos (Oporto, 2007; Salcedo, 2011).

En resumen, es importante definir el impacto de las decisiones relacionadas con el mejoramiento de la confiabilidad (inversiones, tecnología, complejidad técnica, frecuencia de fallas, etc.), ya que estas decisiones, tienen una gran influencia sobre el desempeño del sistema (Yañez, 2010).

6. METODOLOGÍA

A continuación se expone el diagrama de flujos en el que describe las principales actividades que se realizarán para alcanzar el objetivo general de la tesis. Se explica sobre la recolección de datos y fuente de información utilizada en el análisis estadístico, el software utilizado para el procesamiento de datos, los resultados que se esperan obtener y las conclusiones. Mayor detalle de estas actividades son descritas a continuación.

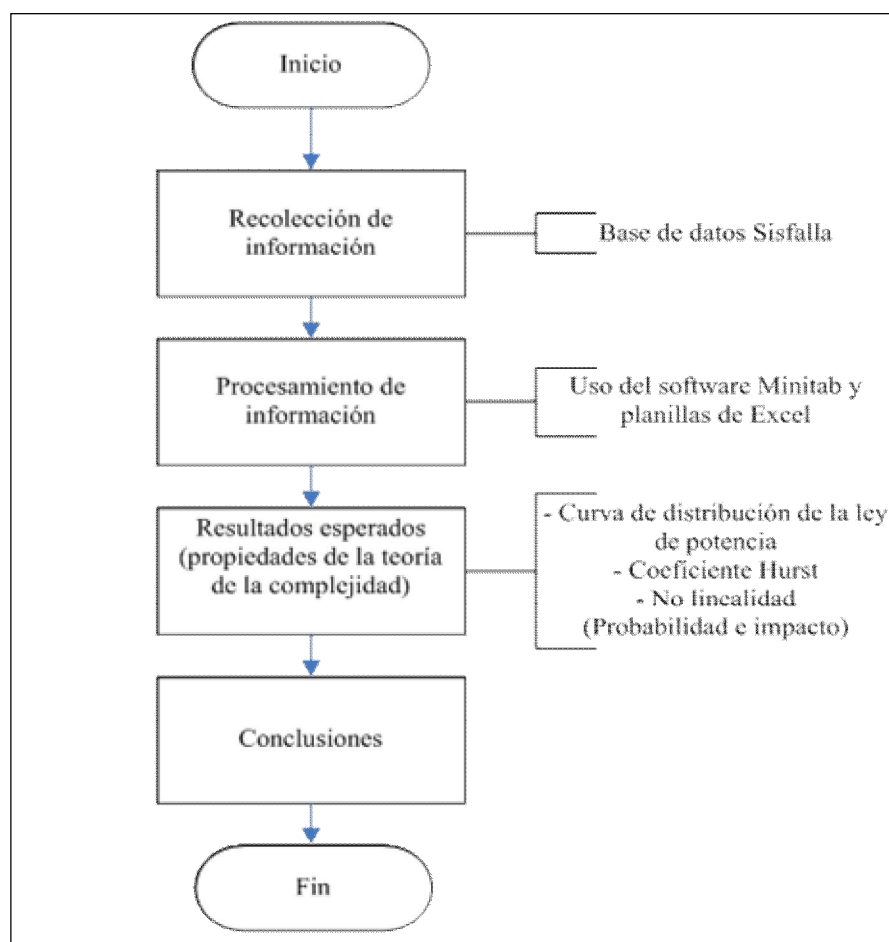


Figura 6-1: Diagrama de flujos de la metodología

6.1 Recolección de Información

La información estadística de fallas fue obtenida de la base de datos denominada “Sisfalla” utilizada actualmente por el Comité Nacional de Despacho de Carga de Bolivia (CNDC). Esta base de datos almacena información desde el año 2005 hasta el presente, en dicho periodo se han registrado un total de 1916 fallas.



The diagram illustrates the data collection process. On the left, a database cylinder and a globe are shown with a large arrow pointing to the right, towards a software application window titled 'sisfalla Aplicación'.

The application window, titled 'Crear/Editar Informe de Falla', contains the following information:

- Registro de Falla: 0159-11
- Fecha y Hora Falla: 01/07/2011 23:08:15
- Usuario: CNDC
- Tipo de Informe: Preliminar (dropdown menu)
- Num. Falla Usuario: 0159-11
- Fecha y Hora Inf: 02/07/2011 03:34:30
- Componente Fallado: AAC-ACH069 LT1 Alto Achachicala - Achachicala en 69 kV
- Origen: Instalaciones de Distribución
- Tipo de Desconexión: Forzada
- Causa: Condiciones climáticas
- Elaborado por: Wilson Barrón Soto
- Descripción de la Falla y Procedimiento de Restitución (button)

Figura 6-2: Recolección de información de fallas

A través de esta base de datos, desarrollada en Oracle, todos los agentes (generadores, distribuidores, transmisores, consumidores no regulados y operador) involucrados en una falla tienen la obligación de informar sobre dicha falla (Superintendencia de Electricidad, 2004). Entre algunos de los parámetros informados se encuentra el origen de la falla, los componentes involucrados, tiempo de desconexión, potencia desconectada, fecha de la falla, activación del Esquema de Alivio de Carga (EDAC).

Una vez obtenida la información del Sisfalla, para el análisis estadístico, es exportado a las planillas de Excel, en donde se realiza el tratamiento de información con la finalidad de verificar y filtrar información coherente.

6.2 Procesamiento de Información

Para la determinación de la distribución dada por la ley de potencia, el ajuste de los datos es realizado utilizando el software Minitab versión 15 español (Minitab Inc, 2007). Este software permite el análisis de estadísticas básicas como la estadística descriptiva, pruebas Z o t, prueba de normalidad, bondad de ajuste para Poisson, etc. También, permite realizar el análisis de regresión, tanto simple como múltiple, mínimos cuadrados parciales, regresión logística, etc. (Minitab Inc, 2007)

En el presente trabajo de investigación, las herramientas utilizadas del software de Minitab son las correspondientes a estadística descriptiva, regresión y gráfica de línea ajustada. La herramienta de estadística descriptiva permite obtener los

histogramas y promedios de los diferentes parámetros eléctricos. La herramienta de regresión y gráfica de línea ajustada contribuyen en la obtención de la función de distribución de probabilidades de los diferentes parámetros eléctricos.

Para determinar el coeficiente de Hurst y la valoración del impacto de los eventos de distintos tamaños se utiliza las planillas de Excel.

6.3 Resultados Obtenidos

Posterior al tratamiento estadístico, realizado tanto en Minitab como a través del uso de planillas Excel, se evalúan los resultados obtenidos con la finalidad de verificar si se cumplen las propiedades de los sistemas complejos. Los resultados que se esperan obtener corresponden a la distribución de la ley de potencia para la energía no suministrada, potencia y alimentadores desconectados y tiempo entre fallas. En función a la distribución de la energía también se espera obtener la valoración del riesgo de pequeños y grandes eventos con la finalidad de valorar la magnitud y probabilidad de estos eventos y comparar el impacto en los costos del sistema. Así mismo, se espera obtener el coeficiente de Hurst cuyo valor permitirá concluir si las fallas registradas en el sistema eléctrico de Bolivia son pasibles de una memoria de largo plazo.

7. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL DE BOLIVIA

El caso de estudio es el Sistema Interconectado Nacional de Bolivia. En ese sentido, a continuación se realiza una descripción de las principales características de dicho sistema, la información histórica considerada para el tratamiento estadístico y los resultados obtenidos.

7.1 Características del Sistema Interconectado Nacional de Bolivia

El Sistema Interconectado Nacional de Bolivia (SIN) está conformado por instalaciones de generación, transmisión y distribución que operan en forma coordinada para suministrar energía eléctrica a los departamentos de La Paz, Beni, Santa Cruz, Cochabamba, Oruro, Potosí y Chuquisaca, que representan el 90% de la demanda total del país, (Figura 7-1, lado izquierdo). A diciembre 2010 se tenía una capacidad de generación de 1272 MW, de los cuales el 62% es generación termoeléctrica y 38% generación hidroeléctrica (Figura 7-1, lado derecho). El parque termoeléctrico está constituido principalmente por tecnología a gas de ciclo abierto. (Autoridad de Electricidad, 2010; CNDC, 2011)

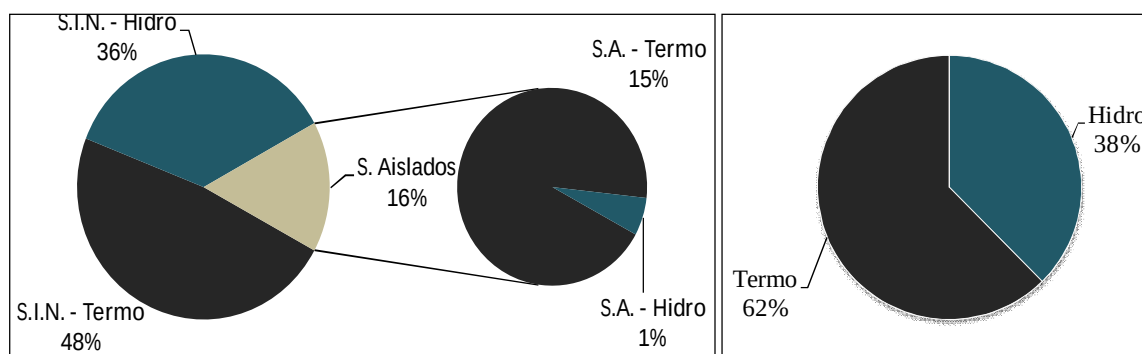


Figura 7-1: Composición del parque generador en el sistema eléctrico de Bolivia.

Las empresas con mayor participación en la capacidad instalada son Guaracachi (29%), COBEE (17%), Valle Hermoso (15%) y Corani (12%) (Figura 7-2). La empresa Guaracachi tiene unidades de generación térmicas de ciclo abierto cuyo combustible es el gas y para el año 2012 tiene previsto la puesta en operación de la central de ciclo combinado con una capacidad de 80 MW (Autoridad de Electricidad, 2010). La evolución de la capacidad instalada por tecnología y empresa es mostrada en Anexo A.

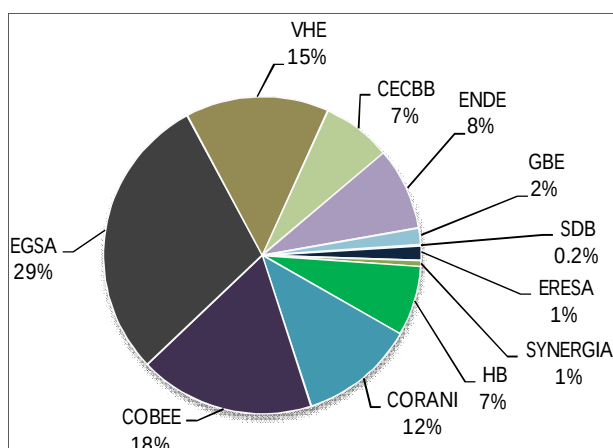


Figura 7-2: Composición de la capacidad instalada por empresa

En cuanto al sistema de transmisión, el Sistema Troncal de Interconexión (STI) es la parte medular del SIN y está conformado por líneas de alta tensión en 230, 115 y 69 kV y sus respectivas subestaciones asociadas. Hasta el año 2010, el STI estaba compuesto por 1,545.1 km de líneas en 230 kV (51%), 1,277.6 km de líneas en 115 kV (43%) y 185.3 km de líneas en 69 kV (6%) (Figura 7-3, lado izquierdo), haciendo un total de 3,008 km de líneas de transmisión. Como se observa en la Figura 7-3, lado derecho, la empresa TDE es propietaria del 100% de las líneas en 69 kV, en cambio en niveles de tensión de 230 kV y 115 kV, el porcentaje de participación es compartida con las empresas ISA y ENDE respectivamente (Autoridad de Electricidad, 2010; CNDC, 2011).

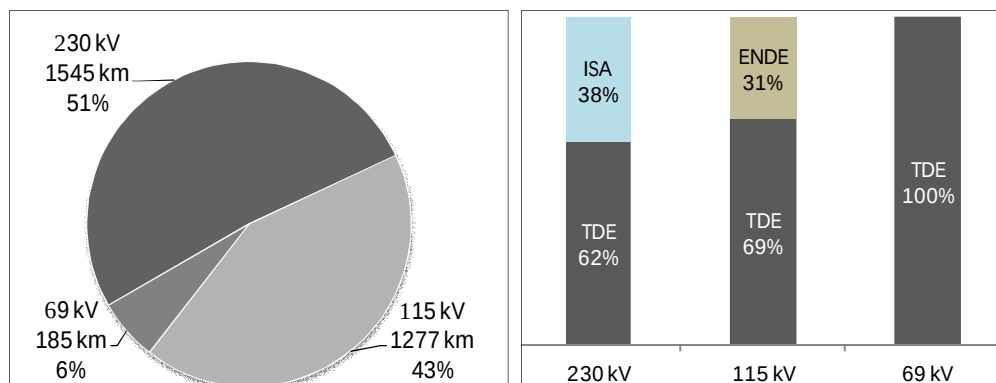


Figura 7-3: Capacidad de transmisión del SIN de Bolivia.

En el periodo comprendido entre el año 2005 y junio de 2011, el origen de las fallas se debió principalmente a condiciones climáticas que representa el 63%, siendo las descargas

atmosféricas la causa más frecuente. El segundo origen de las fallas representa el 16% y es ocasionado por fallas en las propias instalaciones (Figura 7-4).

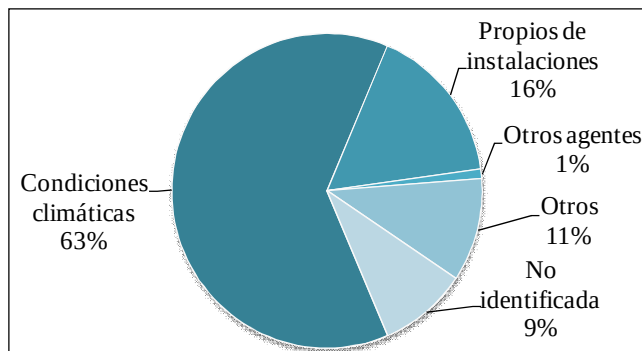


Figura 7-4: Causas que originaron las fallas en el SIN

En la Figura 7-5 se presenta la evolución de los colapsos en el SIN de Bolivia, registrados en el periodo 1998 – 2010. La información con el detalle de fechas y áreas afectadas es mostrada en el Anexo A.

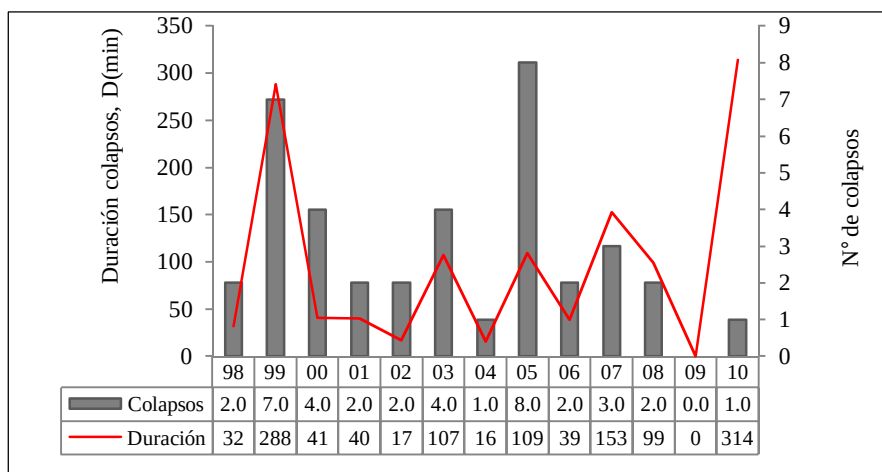


Figura 7-5: Evolución de los colapsos del SIN de Bolivia.

Si bien se observan en frecuencia mayor cantidad de colapsos en las gestiones 1999, 2000 y 2005, en cuanto a duración los mayores registros corresponden a las gestiones 1999, 2007 y 2010, afectando a las áreas norte (La Paz) y centro (Cochabamba, Sucre) de Bolivia.

7.2 Base de Datos

Como se ha mencionado anteriormente, la información ha sido extractada de la base de datos del Sisfalla y corresponde al periodo enero 2005 a junio 2011. En total se han

registrado 1916 fallas, de los cuales, debido a que solo se consideran aquellos que activaron el EDAC y debido al tratamiento previo de datos, para el análisis estadístico solo se toman 1490 fallas. Debido a la disponibilidad de información los parámetros eléctricos considerados en el análisis corresponden a la energía no suministrada en cada falla (ENS), potencia desconectada, tiempo entre fallas y alimentadores desconectados en cada falla.

7.3 Resultados

En base a la información procesada en el software de Minitab y en las planillas de Excel se han obtenido las curvas de distribución para los diferentes parámetros eléctricos, así como el coeficiente de Hurst y la cuantificación del impacto de eventos de distintos tamaños.

Los resultados son mostrados a continuación y de manera complementaria, se comenta los mismos en base al marco conceptual expuesto en la sección 5.

7.3.1 Criticalidad Auto-organizada y Ley de Potencia

La curva de distribución ha sido determinada para los parámetros de energía no suministrada, potencia desconectada, tiempo entre fallas y alimentadores desconectados.

a) Energía no Suministrada

En la serie de tiempo de la ENS, representada por medio de un histograma en la Figura 7-6, se muestra un sesgo hacia valores extremos del conjunto de fallas. Estos valores extremos corresponden a ENS mayor a 2700 MWh con una probabilidad de ocurrencia menor a 1%.

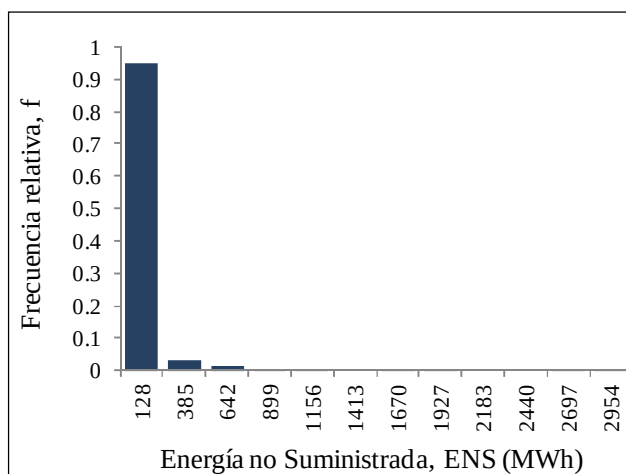


Figura 7-6: Análisis de las series de tiempo de ENS. Histograma de los datos de ENS.

En la Figura 7-7 se muestra la distribución de probabilidad de la ENS en escala logarítmica, describiendo un comportamiento muy similar a la ley de la potencia, observándose la presencia de mayor probabilidad de fallas pequeñas (representada por una energía no suministrada menor a 128 MWh), mientras que existe una menor, pero aún muy importante, probabilidad de fallas mayores o blackouts (energía suministrada mayor a 900 MWh). Los eventos de mayor magnitud son todavía bastante probables, presentando un decaimiento lineal en la probabilidad (en el plano log-log) en lugar del tradicional decaimiento exponencial que caracteriza a muchos sistemas lineales. El ajuste de la ley de potencia es bueno y explica los diversos eventos, incluyendo eventos muy pequeños (con probabilidad de ocurrencia mayor al 20%) como eventos mayores (con probabilidad menor a 0.0001%).

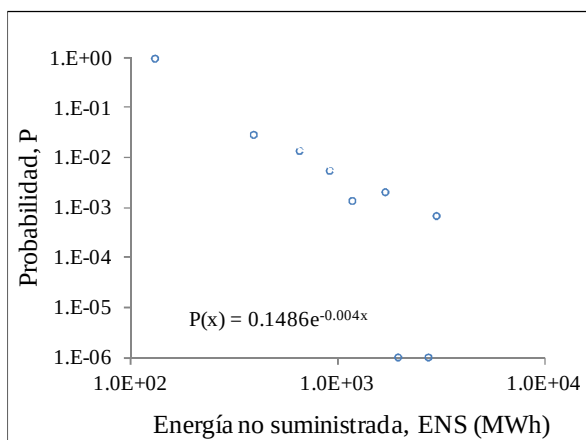


Figura 7-7: Análisis de las series de tiempo de ENS. Gráfico log-log de la función de distribución de probabilidad de la ENS

b) Potencia Desconectada

En la Figura 7-8 se observa que existe una mayor concentración de datos correspondientes a potencias desconectadas menor a 25 MW y eventos mayores a 229 MW que en algunos casos solo se presentan en una ocasión, lo que da a esta distribución la característica de tener cola larga o valores extremos.

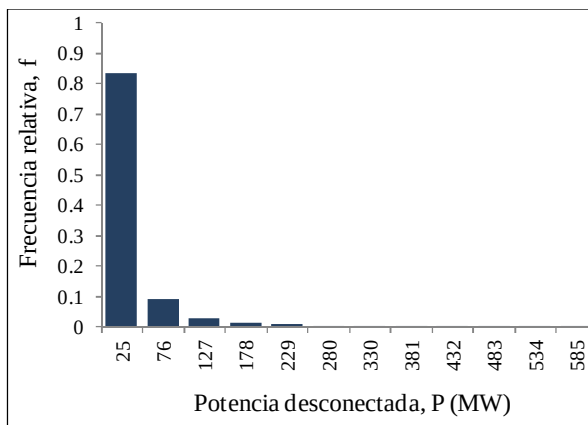


Figura 7-8: Análisis de las series de tiempo de la potencia desconectada en cada falla. Histograma de la magnitud de la potencia desconectada en cada falla

La distribución de la serie de potencia desconectada también presenta cola larga y una ley de potencia (Figura 7-9). Se observan muchos eventos con potencia desconectada menor a 1 MW y frecuencia y probabilidad de ocurrencia mayor al 20%, mientras que eventos de mayor potencia desconectada son menos frecuentes pero relevantes, por ejemplo, mayores a 500 MW con probabilidad de ocurrencia menor a 0.1%.

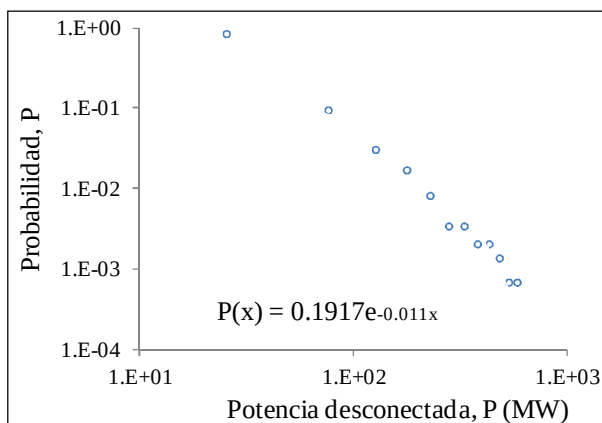


Figura 7-9: Análisis de las series de tiempo de la potencia desconectada en cada falla. Gráfico log-log de la función de distribución de probabilidad de la potencia desconectada.

c) Alimentadores Desconectados (Profundidad)

La profundidad de las fallas, que ha sido representada por la cantidad de alimentadores desconectados en cada falla, también presenta un comportamiento según la ley de potencia. El histograma de la profundidad se muestra en la Figura 7-10, en la misma se observa que la mayor concentración de información corresponde a la desconexión de menos de 6

alimentadores en cada falla, aunque también se encuentran valores extremos con más de 40 alimentadores desconectados en cada falla.

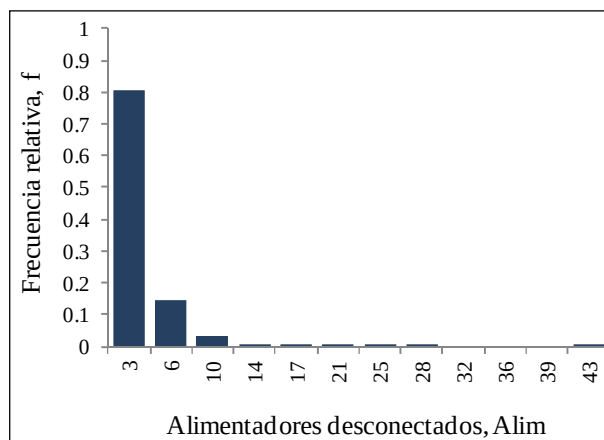


Figura 7-10: Análisis de las series de tiempo de la profundidad de la falla. Histograma de la cantidad de alimentadores desconectados en cada falla.

La Figura 7-11 corresponde a la distribución de alimentadores desconectados mostrada en escala doble logarítmica. Se observa que en más de un 90% de los casos se produce la desconexión de menos de 6 alimentadores por falla, aunque también se encuentran valores extremos con más de 40 alimentadores desconectados por falla, pero con una frecuencia menor al 1 %. Un evento extraordinario que considere la desconexión de más de 40 alimentadores corresponde a dejar sin suministro una de las grandes ciudades de Bolivia, como la ciudad de La Paz, es decir, un evento con un gran impacto económico y social.

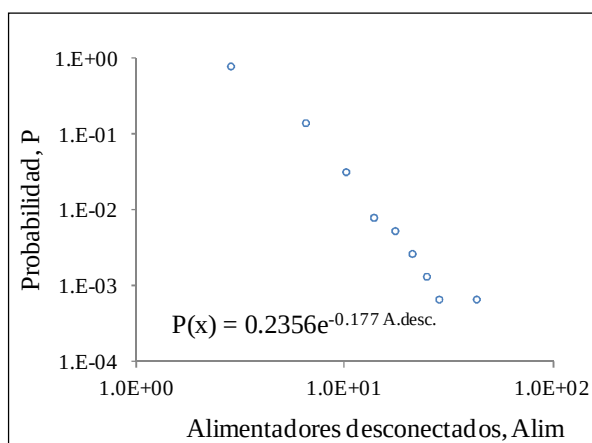


Figura 7-11: Análisis de las series de tiempo de la profundidad de la falla. Gráfico log-log de la función de distribución de probabilidad de la profundidad.

d) Tiempo entre Fallas

En la Figura 7-12 se muestra la información de la serie de tiempo que representa la cantidad de horas entre cada falla. En promedio, una falla que activa el esquema de desconexión automática de carga se presenta cada 28 horas.

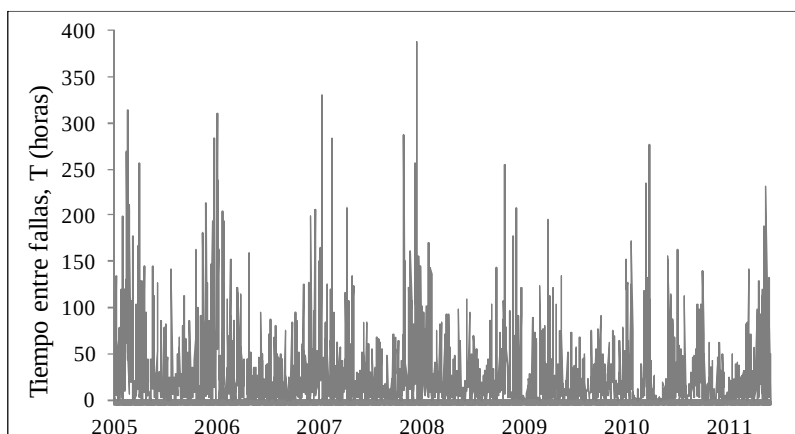


Figura 7-12: Tiempo entre fallas para el periodo 2005 al 2011

En la Figura 7-13 se muestra el histograma y el modelo que describe el comportamiento de la serie de tiempo entre fallas. Se observa que la mayor concentración de datos se encuentra alrededor de fallas que ocurren con mayor frecuencia. La información estadística muestra que estas fallas comúnmente son originadas por condiciones ambientales (descargas atmosféricas) y se despejan por actuación del sistema de protección (recierre automático) y otras fallas que no siendo despejadas correctamente se propagan, produciendo una cascada de fallas, que en algunos casos puede terminar en un blackout.

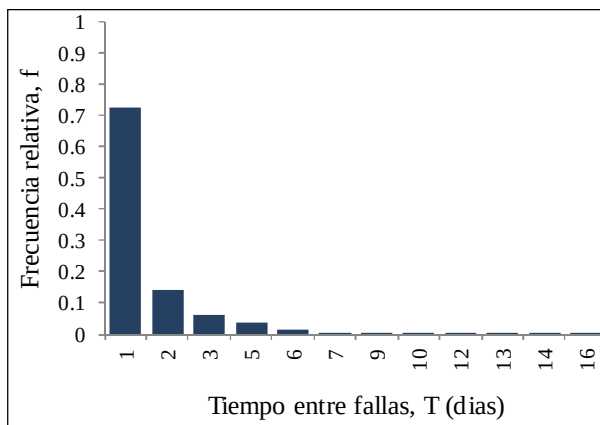


Figura 7-13: Análisis de las series de tiempo de la profundidad de las fallas. Histograma del tiempo entre fallas.

La distribución de este parámetro explica que para un tiempo entre fallas, con activación del EDAC, mayor a 6 días se tiene una probabilidad de ocurrencia menor a 0.04%.

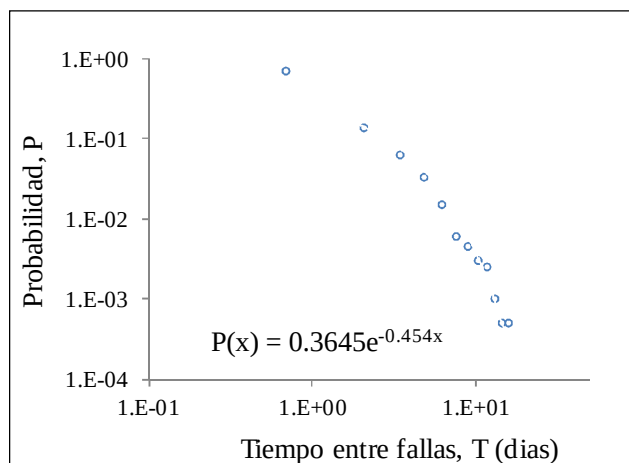


Figura 7-14: Análisis de las series de tiempo de la profundidad de la falla. Gráfico log-log de la función de distribución de probabilidad del tiempo entre fallas.

En base a la información recopilada y al análisis de las series de tiempo, se podría establecer preliminarmente que la ocurrencia de fallas de gran magnitud se da luego de un tiempo considerable respecto de la ocurrencia de fallas menores.

7.3.2 Coeficiente de Hurst

En base al método R/S, descrito en la sección 5, se determinó el coeficiente de Hurst para las series de tiempo de ENS, potencia desconectada, profundidad y tiempo de restitución de las fallas. El resultado de la regresión presentado en la Tabla 7.1 muestra que el coeficiente de Hurst es mayor a 0.5, lo que de acuerdo a definiciones realizadas previamente, indica persistencia en las series de tiempo analizadas.

Tabla 7.1: Resultados de la regresión del coeficiente Hurst

Concepto	ENS	P. desconectada	Profundidad	T. reposición
H estimado	0.55	0.74	0.64	0.51
Error estándar	0.08	0.06	0.05	0.10
R ²	0.98	0.99	1.00	0.98
Constante	-0.11	-0.82	-0.18	-0.02

Para los diferentes parámetros eléctricos se ha obtenido un coeficiente de Hurst que se encuentra en el rango $0.5 < H < 1$, lo que significa que en las series de tiempo analizadas existe una correlación positiva. Es decir, si la serie analizada presenta una tendencia de

hacia arriba (o abajo) respecto a su media de largo plazo del periodo anterior, existe una mayor probabilidad que esa tendencia a la alta (o baja) persista en el periodo siguiente.

7.3.3 No linealidad (Evaluación del Impacto de las Fallas)

En la Figura 7-15 y Figura 7-16 se presenta la evaluación aproximada del impacto de las fallas estimado mediante la energía no suministrada (ENS), es decir, el producto de la potencia desconectada en cada falla y el tiempo para la reposición de dicha falla. El 95% corresponde a fallas de menor magnitud (menores a 257 MWh) y menos del 0.001% representan fallas de gran magnitud (mayores a 2896 MWh). Sin embargo, si el costo de la energía no suministrada es 1500 US\$/MW³, se observa que el costo de las fallas menores solo representan el 4% del costo total de las fallas, en cambio el costo de las fallas de gran magnitud representan cerca del 20% del costo total de las fallas (Figura 7-16).

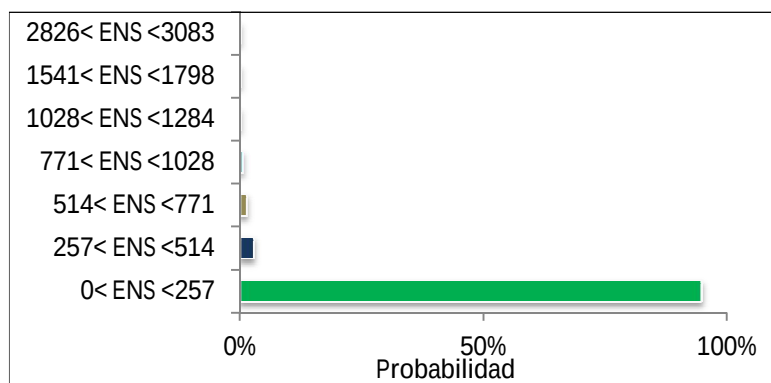


Figura 7-15: Probabilidad de ocurrencia de fallas

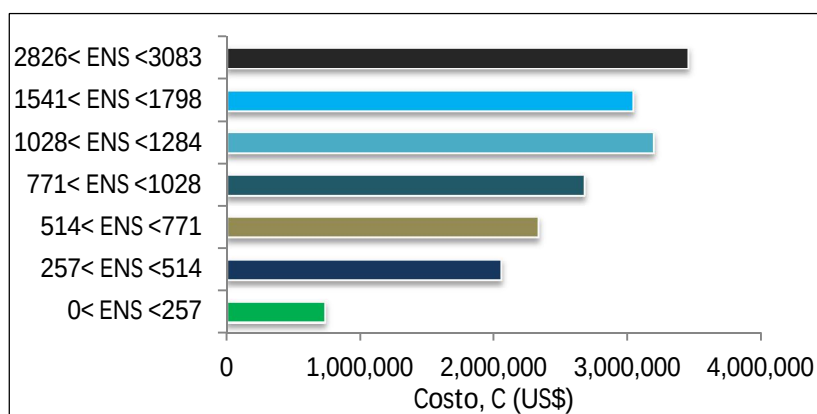


Figura 7-16: Costo de la falla

³ Valor publicado por el Comité Nacional de Despacho de Carga en el Informe de Mediano Plazo de septiembre de 2011

Este análisis sugiere que si bien la probabilidad de ocurrencia de un blackout es baja, este evento no debe ser despreciado en los estudios de planificación del sistema, porque como se observa en la figura anterior cuando ocurren estos eventos atípicos ocasionan importantes pérdidas económicas. Esto pone en evidencia la necesidad de no centrarse sólo en la probabilidad de los eventos, sino que también en su impacto, la apropiada evaluación del riesgo sería muy importante al evaluar la confiabilidad del sistema.

7.3.4 Comparación con Grandes Sistemas

Con la finalidad de ver si el comportamiento de las fallas de sistemas menores es similar al de grandes sistemas, como es el caso de los países desarrollados como China y Estados Unidos, los resultados obtenidos son comparados con los resultados de Dobson (Dobson & Carreras, 2004) y Zhao (Zhao, et al., 2009), quienes para su análisis consideraron una base de datos con información de 15 años y de veinte años respectivamente. En la Figura 7-17 se presenta la curva de distribución obtenido por Dobson, en base a información de la NERC, (Dobson & Carreras, 2004) y la curva de distribución para Bolivia. Se observa similitud (en cuanto a la forma) en la representación de las distribuciones que caracterizan los tiempos entre fallas en sistema eléctricos distintos en cuanto a topología y tamaño. En términos generales, la evidencia empírica indica que el comportamiento en cuanto a la dinámica de las fallas puede ser representa por la ley de potencia y la misma prevalece independientemente del tamaño y topología.

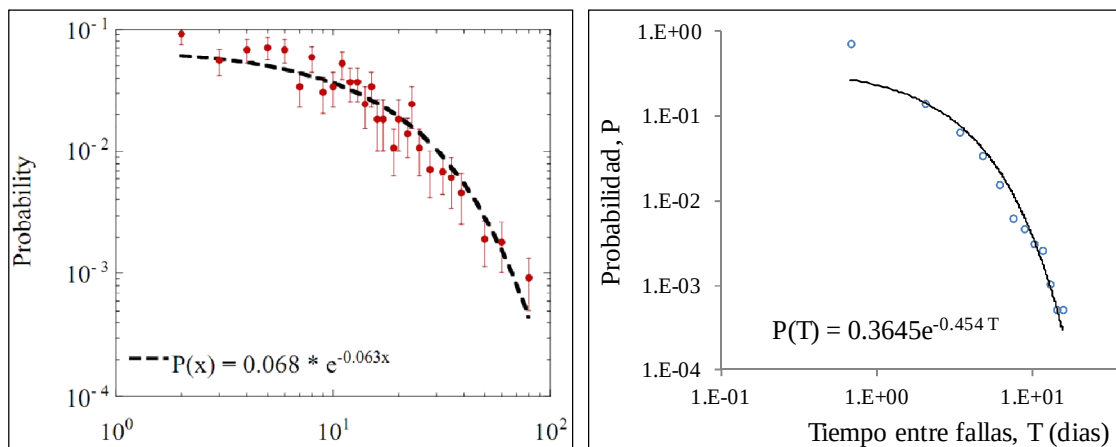


Figura 7-17. Comparación de modelos que denotan el comportamiento del tiempo entre fallas. Lado izquierdo, modelo obtenido por Dobson con la información de NERC. Lado derecho, modelo obtenido para el sistema boliviano

En la Tabla 7.2 se presenta la comparación de los coeficientes de Hurst obtenidos para las series de tiempo de NERC (Dobson & Carreras, 2004), China (Zhao, et al., 2009) y Bolivia. Los resultados obtenidos para Bolivia muestran un coeficiente de Hurst mayor a 0.5, similar a los obtenidos por Dobson para NERC y Zhao para China.

Tabla 7.2: Comparación del coeficiente de Hurst

Serie de tiempo	Norte América	China	Bolivia
ENS	0.53	0.69	0.55
P.desconectada	0.59	0.65	0.74
Profundidad	0.57	-	0.64
T. reposición	-	0.60	0.51

De la tabla anterior se obtiene una conclusión importante que se refiere a que el coeficiente de Hurst depende del tamaño de la muestra. Así los coeficientes de Dobson y Zhao, al estar calculados en base a mayor información histórica (Dobson considera la información de 15 años y Zhao 20 años) se tiene tendencia definida, en cambio los coeficientes para el sistema de Bolivia no tienen una tendencia definida (0.51 en el extremo inferior y 0.74 en el extremo superior).

8. CONCLUSIONES

El Sistema Troncal de Interconexión (STI) de Bolivia es la parte medular del SIN, opera en niveles de tensión de 230, 115 y 69 kV. A fines del año 2010 estaba conformada por un total de 3008 km de líneas de transmisión. El parque de generación está conformado en un 62% por generación termoeléctrica y 38% por generación hidroeléctrica.

Durante el periodo 2005 – 2011, en promedio se registraron 227 fallas y 10 GWh de energía no suministrada por año. El tiempo promedio de restitución de cada falla es de 130 minutos, con una energía no suministrada de 47 MWh y un desprendimiento promedio de 3 alimentadores. Respecto a los blackouts y colapsos parciales, durante el periodo 1998-2010 en promedio se registraron 3 eventos mayores por año, aunque durante los últimos estos han ido en decremento, no registrándose incluso ningún blackout ni colapso parcial durante el año 2009.

Para el tratamiento estadístico se ha considerado la información histórica de 1490 fallas registrados en el periodo 2005-2011 y que ocasionaron la activación del EDAC. La

información corresponde a las series de tiempo de energía no suministrada, potencia desconectada, tiempo entre fallas y alimentadores desconectados.

El estudio del sistema eléctrico boliviano ilustra la aplicación de la teoría de la complejidad y expone resultados interesantes a pesar de las limitaciones en cuanto a la cantidad de información histórica.

Los resultados del tratamiento estadístico de las series de tiempo de las fallas del Sistema Interconectado Nacional de Bolivia, dan cuenta de un sistema complejo caracterizado por la criticalidad auto-organizada cuya distribución es consistente con la ley de potencia $\alpha e^{-\beta x}$. Para el caso de la ENS la distribución es $0.1486e^{-0.004 ENS}$, para la potencia desconectada es $0.1917e^{-0.011 P.desc.}$, para los alimentadores desconectados es $0.2356e^{-0.177 A.desc.}$ y para el tiempo entre fallas es $0.3645e^{-0.454 T}$.

Esto significa que, si bien la mayor concentración (mayor probabilidad de ocurrencia) de eventos los conforman fallas menores, hay un pequeño número de eventos mayores con menor, pero todavía bastante significativa, probabilidad de ocurrencia. Además, cuando estos se presentan ocurren altos niveles de energía no servida causando tremendos impactos negativos en la sociedad, por lo que el riesgo asociado a estos eventos es muy grande. A partir de esto está claro que descartar este tipo de escenarios improbables del análisis de confiabilidad puede llevar a soluciones subóptimas y riesgosas.

Los valores estimados del coeficiente de Hurst denotan la característica de persistencia ($H > 0.5$). Es decir, existe una dependencia de largo plazo en el sistema, donde una condición anterior del sistema puede gatillar el acontecimiento de un evento mucho mayor, especialmente si se alcanza una condición crítica en el sistema. En esta condición un pequeño cambio en valores iniciales puede tener dramáticos efectos en el resultado del sistema.

Los resultados de la evaluación cuantitativa del riesgo (valorizado simplemente en términos de energía) de falla muestran que a pesar de que se presenta una concentración alta de fallas menores en el sistema eléctrico, si estos son valorizados, el costo solo representa el 4% del total del costo total de falla para el sistema. Por otra parte, si bien la

probabilidad de ocurrencia del blackout es baja este representa un 20% del costo total esperado de las fallas.

Los resultados obtenidos en este estudio para Bolivia son consistentes con los obtenidos por Dobson y Zhao para grandes sistemas (EE.UU y China), es decir, las fallas son explicadas por una ley de potencia que da cuenta de un sistema críticamente auto-organizado. Estos resultados son sorprendentes, pues sugieren que estas características no tienen su origen en el tamaño y compleja topología de los sistemas, sino que en su propia naturaleza.

9. TRABAJOS FUTUROS

De acuerdo a los resultados obtenidos, la revisión bibliográfica e información recopilada durante el desarrollo de este trabajo, se dispone de elementos para establecer criterios que se empleen como referencia para el emprendimiento de algunos trabajos futuros relacionados con la teoría de la complejidad, como por ejemplo:

- El empleo de otros métodos para determinar el coeficiente de Hurst, para evaluar la sensibilidad en la determinación de este coeficiente ante distintas ventanas de tiempo o configuración del sistema.
- Continuando con el coeficiente de Hurst, introducir en el procesamiento de la información el test estadístico con la finalidad de evaluar la robustez de los resultados obtenidos en el presente trabajo.
- Plantear un modelo de planificación que considere el impacto de los distintos eventos, esto es, considerando la probabilidad de ocurrencia de eventos de distintas magnitudes.
- Aplicar la teoría de la complejidad en el área de mercados eléctricos, a través de la teoría de juegos considerando alguna de las características del sistema complejo, como la interacción entre los agentes participantes en el mercado, la memoria de largo plazo, basado en la información histórica del sistema, los valores extremos, etc.

Se deja para un futuro debate el análisis de las causas que dan lugar a la ley de potencia y la persistencia o memoria de largo plazo en sistemas eléctricos.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamic, L. (2000). Zipf, power - laws, and Pareto a ranking tutorial Retrieved 22 noviembre, 2011, from <http://www.hpl.hp.com/research/idl/papers/ranking/ranking.html>
- Aljure, Y., Gallego, A., & Jiménez, J. (2008). Desigualdad y leyes de potencia. In U. Javeriana (Ed.), *Documentos de Economía* (Vol. julio). Colombia: 2008.
- Amaro, I., Demey, J., & Macchiavelli, R. (2004). Aplicación del análisis r/s de Hurst para estudiar las propiedades fractales de la precipitación en Venezuela. *Interciencia*, 29, 617-620.
- Ansi, W., Yi, L., Guangyu, T., & Pei, L. Vulnerability Assessment Scheme for Power System Transmission Networks Based on the Fault Chain Theory. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26(1), 442-450.
- Ansi, W., Yi, L., Guangyu, T., & Pei, L. (2011). Vulnerability assessment scheme for power system transmission networks based on the fault chain theory. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 26(1), 442-450.
- Asahi, N. (2011). Fukushima Meltdown Retrieved 20 de noviembre, 2011, from <http://www.asahi-net.or.jp/~pu4i-aok/cooldata2/politics/fukushimameltdown.htm>
- Autoridad de Electricidad (2010). *Anuario Estadístico 2009*. La Paz, Bolivia: AE, Autoridad de Fiscalización y Control Social de Electricidad.
- Baldick, R., Chowdhury, B., Dobson, I., Zhaoyang, D., Bei, G., Hawkins, D., et al. (2008, 20-24 July 2008). *Initial review of methods for cascading failure analysis in electric power transmission systems IEEE PES CAMS task force on understanding, prediction, mitigation and restoration of cascading failures*. Paper presented at the Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE.
- Bar-Yam, Y. (2004). Multiscale variety in complex systems. *Complexity*, 9(Wiley Periodicals), 37-45.

Benita, F., & Martínez, A. (2011). Regularidades empíricas de la estructura industrial mexicana: Evidencia de la Ley de Zipf. *Redalyc*, 52, Mayo-Agosto, 21-26.

Calduch, R. (1998). *Métodos y técnicas de investigación internacional*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.

Cardona, J. (2007). *Módulo fractales*. Medellín: Instituto de Sistemas Complejos.

Carneiro, M., & Charret, I. (2005). A criticalidade auto-organizada na pilha de areia. *Revista Brasileira de ensino de física*, 27, 571-576.

Carreras, B. A., Lynch, V. E., Dobson, I., & Newman, D. E. (2002). Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts. 12, *Number 4*.

Carreras, B. A., Newman, D. E., Dobson, I., & Poole, A. B. (2001, 3-6 Jan. 2001). *Evidence for self-organized criticality in electric power system blackouts*. Paper presented at the System Sciences, 2001. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on.

Carreras, B. A., Newman, D. E., Dobson, I., & Poole, A. B. (2004). Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 51(9), 1733-1740.

Casparri, M., & Moreno, A. (2004). Geometría fractal y mercados financieros. *Centro de Investigación en Métodos Cuantitativos Aplicados a la Economía y la Gestión*.

CNDC (2011). Memoria anual 2010. In Comité Nacional de Despacho de Carga (Ed.). Cochabamba, Bolivia.

Dobson, I., & Carreras, B. (2000). *Initial evidence for self-organized criticality in electric power systems blackouts*. Paper presented at the International Conference on Systems Sciences.

Dobson, I., & Carreras, B. (2004). Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power systems blackouts. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 51, N° 9.

Dobson, I., & Carreras, B. (2007). *Complex systems analysis of series of blackouts: cascading failure, critical points, and self-organization*.

Dobson, I., & Carreras, B. (2010, 29 Sept. - 1 Oct). *Number and propagation of line outages in cascading events in electric power transmission systems*. Paper presented at the 48th Annual Conference on Communication, Control, and Computing, Allerton.

Dobson, I., Kim, J., & Wierzbicki, K. (2010). Testing branching process estimators of cascading failure with data from a simulation of transmission line outages. 40, N°3, 650-662. Retrieved from <http://www.ece.wisc.edu/~dobson/PAPERS/dobsonRA10preprint.pdf>

Dobson, I., Wierzbicki, K., Carreras, B., Lynch, V., & Newman, D. (2006, 04-07 Jan.). *An estimator of propagation of cascading failure*. Paper presented at the HICSS '06, Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences.

Enciso, O. (2008). *Análisis del proceso electoral presidencial mexicano del 2 de julio de 2006*. Universidad de las Américas Puebla, Cholula, Puebla.

Espinosa, C., Parisi, F., & Parisi, A. (2005). *Evidence of chaotic behavior in American stock markets*. Universidad Diego Portales, Chile.

Freitas, D., Sand, G., Pereira, L., & Da Silva, P. (2010). *Correlação de longa-duração e análise bayesiana da evolução temporal dos terremotos ao longo da falha de Samambaia, nordeste do Brasil*.

Gálvez, E. (2005). *Análisis fractal del mercado de valores de México (1978-2004)*. Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.

García, A., Jiménez, F., & Ayuso, J. (2008). La criticalidad auto-organizada y el análisis de datos históricos de lluvia en Córdoba (Andalucía). *Fundación para el fomento de la ingeniería del agua*, 15, N°1.

Gleria, I., Matsushita, R., & Da Silva, S. (2004). *Sistemas complexos, criticalidade e leis de potência*. Faculdade de Ciencias Economicas, Porto Alegre.

Hines, P., & Blumsack, S. (2008, 7-10 Jan. 2008). *A Centrality Measure for Electrical Networks*. Paper presented at the Hawaii International Conference on System Sciences, Proceedings of the 41st Annual.

Hines, P., Cotilla-Sánchez, E., & Blumsack, S. (2011). *Topological models and critical slowing down: Two approaches to power system blackout risk analysis*. Paper presented at the International Conference on System Sciences.

Hines, P., O'Hara, B., Costilla-Sánchez, E., & Danforth, C. (2011). Cascading failures: Extreme properties of large blackouts in the electric grid. *Mathematics, Statistics, and the Data Deluge*, April,

INE (2011). Estadísticas. *Instituto Nacional de Estadística*. Chile.

MacGill, V. (2007). Power law distributions. *A non-technical introduction to the new science of chaos and complexity* Retrieved 2 noviembre, 2011, from <http://complexity.orconhosting.net.nz/powerlaw.html>

Maldonado, C. (2009, 27 - 30 oct.). *El problema de una teoría general de la complejidad*. Paper presented at the IV Encuentro Interuniversitario sobre Complejidad, Bogotá.

Martínez, J. (2005). *Aplicación del análisis de Hurst al estudio del comportamiento de lechos fluizados gas - sólido 2-D*. Universidad de Alcalá.

Minitab Inc (2007). *Guía para usuarios. Meet Minitab 15 para Windows* (2007 ed.). Estados Unidos.

Morin, E. (2007). Complejidad y salud en el siglo XXI Retrieved 23 de marzo, 2012, from http://bvs.sld.cu/revistas/spu/vol33_4_07/spu11407.html

Motter, A., & Lai, Y. (2002). Cascade-based attacks on complex networks. *Physical review letters*.

- Nedic, D., Dobson, I., Kirschen, D., Carreras, B., & Lynch, V. (2005). *Criticality in cascading failure blackout model*. Paper presented at the 15th Power Systems Computation Conference.
- Newman, M. (2004). Power laws, Pareto Distributions and Zipf's law. *Theory of Complex Systems* Retrieved 2 de noviembre, 2011, from <http://www-personal.umich.edu/~mejn/courses/2006/cmplxsys899/>
- Oporto, M. (2007). Administración de los riesgos del proyecto Retrieved 8 de enero, 2012, from <http://www.wiphala.net/courses/>
- Papic, M. (2011). *Survey of tools for risk assessment of cascading outages*. Paper presented at the Power and Energy Society General Meeting.
- Pérez, R. (2004). *Sobre la teoría del caos aplicada en sismotectónica: geometría fractal de fallas y terremotos*. Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Peters, E. (1994). *Fractal market analysis: Applying chaos theory to investment and economics*.
- Quezada, A. (2006). *Fractales y opinión pública: una aplicación del exponente de Hurst al estudio de la dinámica de la identificación ideológica*. Universidad de Barcelona.
- Reynoso, C. (2006). *Complejidad y el caos: Una exploración antropológica*. Paper presented at the Iera. Reunión Latinoamericana de Análisis de Redes, La Plata, Argentina.
- Reynoso, C. (2008). Hacia la complejidad por la vía de las redes. Nuevas lecciones epistemológicas. 28 (septiembre-diciembre), 17-40.
- Rivas, F., & Elberg, M. (2008). Caracterización de la actividad sísmica en la región andina utilizando técnicas no lineales. *Ciencia e Ingeniería*, 29 (3), 261-268.
- Rodríguez, L. (2010). *Cartografía de los enfoques de complejidad y mapeo de los estudios en América Latina*. Paper presented at the Emergencia de la Complejidad en la Historia de la Ciencia, Argentina.

Sabogal, G., & Vega, J. (2006). Análisis de trazas de video mpeg4. *Umbral científico*, 8 (junio), 62-72

Salcedo, E. (2011). *Interdisciplinariedad en estudio de amenazas, vulnerabilidad y riesgo*. Paper presented at the Seminario Métodos Interdisciplinarios.

Salvador, A. (1994). *Fractales y caos: Estructura fractal de las series temporales. Coeficiente de Hurst. Aplicaciones*. Paper presented at the International Conference in Algebraic Methods in Dynamical Systems.

Sierra, G. (2007). *Procesos Hurst y movimiento browniano fraccional en mercados fractales: Evaluación y aplicaciones a los derivados y finanzas*. México.

Silva, C., Athayde, M., & Vieira, L. (2006). A inserção da teoria dos fractais na contabilidade financeira: Evidencias teórico-empíricas. *6to Congresso Contraloria e Contabilidade*, 6to., 1-15

Soria, K., & Zúñiga, S. (1993). *Algunas estimaciones del coeficiente de Hurst para el IGPA chileno*. Coquimbo, Chile: Universidad Católica del Norte.

Superintendencia de Electricidad (2004). *Reglamento de Calidad de Transmisión*. Bolivia: Ministerio de Energía e Hidrocarburos.

Tamronglak, S., Horowitz, S., Phadke, A., & Thorp, J. (1996). Anatomy of power system blackouts: preventive relaying strategies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(2), 708-715.

Tercero, I. (2009). Criticalidad auto-organizada Retrieved 5 de febrero 2012, from http://coevolucion.net/index.php?option=com_content&view=article&id=108:criticalidad-autoorganizada

Vaiman, M., Bell, K., Yousu, C., Chowdhury, B., Dobson, I., Hines, P., et al. (2011a, 24-29 jul.). *Risk assessment of cascading outages: Methodologies and Challenges*. Paper presented at the Power and Energy Society General Meeting, IEEE.

Vaiman, M., Bell, K., Yousu, C., Chowdhury, B., Dobson, I., Hines, P., et al. (2011b, 24-29 jul.). *Risk assessment of cascading outages: Part I; overview of methodologies*. Paper presented at the Power and Energy Society General Meeting, IEEE.

Villarroel, L. (2010). *Apuntes de la materia de análisis de riesgo financiero, diciembre 2010*. La Paz, Bolivia: Centro Empresarial Latinoamericano.

Watts, D., & Hui, R. (2008, 24-27 nov.). *Classification and discussion on methods for cascading failure Analysis in Transmission System*. Paper presented at the ICSET 2008. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies.

Watts, D., & Ren, H. (2007). *Cascading failures in electric power systems: what about prices?* Paper presented at the Bulk Power System Dynamics and Control - VII.

Watts, J. (2002). A simple model of global cascades on random networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(9), 5766-5771.

Wikipedia (2011a). Teoría del cisne negro Retrieved 7 diciembre, 2011, from http://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_cisne_negro

Wikipedia (2011b). Terremoto y tsunami de Japón 2011 Retrieved 5 de noviembre, 2011, from http://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_y_tsunami_de_Jap%C3%B3n_de_2011

Winslow, N. (1997). *Introduction to Self-Organized Criticality & earthquakes*: Departament of Geological Sciencies.

Yañez, M. (2010). Ingeniería de Confiabilidad: Pilar fundamental del mantenimiento Retrieved 10 de enero, 2012, from <http://confiabilidad.net/articulos/ingenieria-de-confiabilidad-pilar-fundamental-del-mantenimiento/>

Zhao, X., Zhang, X., & He, B. (2009). Study on self organized criticality of China power grid blackouts. *Elsevier. Energy Conversion and Management*, 50(3), 658-661.

ANEXOS

ANEXO A : ESTADÍSTICAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE BOLIVIA

A continuación se presenta la evolución de la capacidad instalada durante el periodo 1996-2010. En el mismo se observa que el parque generador tuvo predominancia de generación térmica, siendo este comportamiento más acentuado durante las últimas gestiones (Figura A-1)

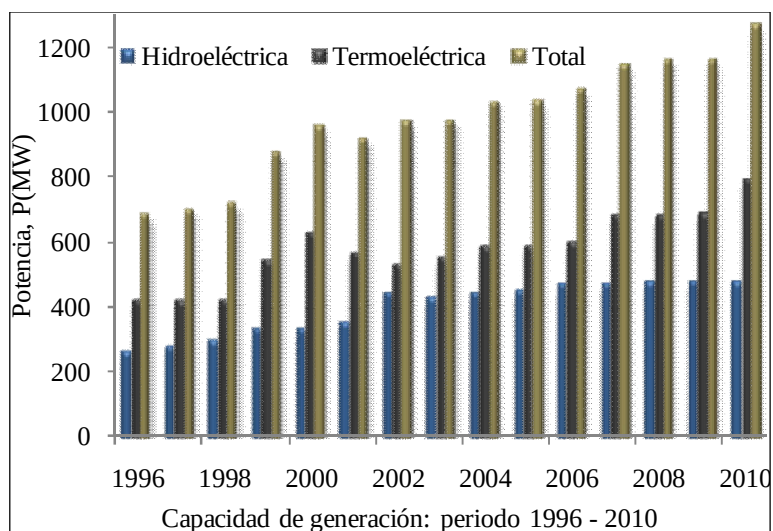


Figura A-1: Evolución de la capacidad instalada (Fuente: (CNDC, 2011))

Respecto a la propiedad de las instalaciones de generación, la empresa que concentra la mayor participación es Guaracachi, que posee cerca del 30% de la capacidad instalada (271 MW) (Tabla A.1). Esta empresa actualmente tiene unidades de generación de tecnología de ciclo abierto pero para el año 2012 tiene proyectado la puesta en operación de una unidad de ciclo combinado de 80 MW de capacidad. Este tipo de tecnología será la primera en implementarse en Bolivia. En cuanto a instalaciones de generación hidroléctrica, las empresas Corani y COBEE concentran la mayor capacidad instalada con centrales de embalse y pasada. Siendo que la mayoría de las centrales hdroeléctricas son de pasada, se usan principalmente las turbinas tipo pelton y para la centrales de altas caídas se tiene la turbina Francis (Central de Taquesi) que es de propiedad de la empresa Hidroeléctrica Boliviana (Autoridad de Electricidad, 2010).

Tabla A.1: Evolución de la capacidad instalada por empresa, expresada en MW

Empresa	Centrales	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Hidroeléctricas																
COBEE	Zongo	119	137	153	183	183	183	183	167	167	168	188	188	188	188	188
CORANI	S. Isabel y Corani	126	126	126	126	126	126	126	128	145	145	147	147	150	150	150
COBEE	Miguillas	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	21	21	21
ERESA	Yura							19	18	19	19	19	19	19	19	19
SYNERGIA	Kanata				8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
HB	Taquesi			1	1	1	1	91	90	90	90	90	90	90	90	90
SDB	Quehata												2	2	2	2
Subtotal		263	281	298	336	336	355	444	428	446	448	470	472	478	478	478
Termoeléctricas (a temperatura media Anual)																
EGSA	Guaracachi	168	168	168	288	288	269	249	249	249	249	254	317	317	271	271
EGSA	Santa Cruz														43	43
VHE	Carrasco	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112	112
VHE	Valle Hermoso	74	74	75	74	74	37	19	37	74	74	74	74	74	74	74
EGSA	Aranjuez	38	38	38	38	32	32	32	32	32	32	39	38	43	43	43
CECBB	Bulo Bulo					88	88	87	90	90	90	90	90	90	90	90
EGSA	Karachipampa	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
COBEE	Kenko	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	19	19
GBE	Guabirá												17	16	21	21
ENDE	Entre Rios															107
Subtotal		424	424	424	544	626	570	532	553	590	590	601	680	684	687	794
TOTAL		687	705	723	880	962	924	976	981	1036	1038	1071	1152	1162	1165	1272

Respecto a los Colapsos registrados en el SIN para el periodo 1998-2010, se observa que los mismos fueron disminuyendo incluso no registrándose ningún colapso el año 2009. A pesar que la frecuencia de colapsos disminuyó, se tiene registros de que la duración de los mismos, en algunos casos aumentó fuertemente, como es el caso del único colapso registrado el año 2010 que tuvo una duración de más de 5 horas (Tabla A.2).

Tabla A.2: Evolución de los colapsos registrados en el periodo 1998-2010

Año	Fecha	Área	Duración (Min)	Duración (hrs.)
1998	15-nov	POTOSÍ	27	0.5
1999	07-nov	SUCRE	5	0.1
1999	26-nov	SUR	55	0.9
1999	23-dic	ORIENTAL	14	0.2
2000	29-dic	SUCRE	5	0.1
2000	02-feb	NORTE	45	0.8
2000	24-mar	SUR	12	0.2
2000	25-jun	SUCRE	95	1.6
2000	21-ago	SUCRE	62	1.0
2000	17-oct	ORIENTAL	17	0.3
2000	25-oct	SUR	5	0.1
2000	22-dic	ORIENTAL	12	0.2
2000	28-dic	ORIENTAL	7	0.1
2001	18-mar	SUR	37	0.6
2001	20-sep	SUCRE	3	0.1
2002	29-jul	NORTE	8	0.1
2002	13-ago	ORIENTAL	9	0.2
2003	20-mar	ORIENTAL	23	0.4
2003	18-jul	CENTRAL,SUR,NORTE	47	0.8
2003	24-oct	NORTE	8	0.1
2003	26-nov	NORTE,CENTRAL	29	0.5
2004	29-Feb	ORIENTAL	16	0.3
2005	01-ene	SUR	8	0.1
2005	09-ene	SUCRE	3	0.1
2005	10-ene	SUR	16	0.3
2005	20-ene	ORIENTAL	16	0.3
2005	03-feb	SUR	36	0.6
2005	27-may	SUCRE	5	0.1
2005	10-sep	NORTE	4	0.1
2005	02-oct	ORIENTAL	21	0.4
2006	09-feb	ORIENTAL	25	0.4
2006	23-nov	SUR,SUCRE	14	0.2
2007	17-mar	ORIENTAL	37	0.6
2007	07-abr	NORTE	86	1.4
2007	13-jun	NORTE	30	0.5
2008	29-abr	CENTRAL(ORURO)	85	1.4
2008	02-oct	NORTE	14	0.2
2009	S/COLAPSOS	0	0	0.0
2010	01-jul	Sucre	314	5.2

ANEXO B : ARTÍCULO PRESENTADO A LA REVISTA IEEE LATINOAMERICANO

El resumen del artículo remitido a la revista IEEE Latinoamericano es presentado a continuación:

Abstract— The occurrence of blackouts in recent years and their impact on society call into question the traditional planning and reliability analysis, which focuses on events of significant chances, without explicitly considering the development of catastrophic situations such as blackouts. The complexity theory provides concepts widely applied in other areas, such as economics and science, opening a new field of study in electrical systems. This would provide complementary tools to traditional analysis, helping explaining, quantifying and modeling events with very low probability and high impact for society, such as blackouts and cascading failures. These new concepts are applied to characterize the Bolivian power system, marking the first application to a Latin American system. Results are surprising because of its failure behavior is consistent with a “power law”, suggesting a complex system, characterized by self-organized criticality (SOC) with long-term memory, where small perturbations can propagate out producing blackouts. This suggests that this theory would be appropriate not only to describe giant systems such as those from China and the U.S., but also for smaller systems, such as the Bolivian and other Latin American ones. It was shown that blackouts provide significant risks that would require explicit modeling and risk management.

A continuación se adjunta el artículo completo remitido a la revista IEEE Latinoamericano: