

C. ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN Y PLANIFICACIÓN A EMPLEAR PARA DETERMINAR EL PLAN DE TRANSMISIÓN

C.1 Modelos de Simulación y Planificación

A los efectos de determinar el Plan de Transmisión se utilizarán los siguientes modelos:

- PERSEO;
- DIGSILENT – Power Factory;
- TO/R – MINIMAX.

Los modelos PERSEO y DIGSILENT son de uso corriente en Perú por parte del OSINERG y el COES para estudios tarifarios y de funcionamiento del sistema de potencia. El software TO/R – MINIMAX es de uso específico para determinar el Plan de Transmisión conforme lo requiere LA NORMA.

A continuación se realiza una breve descripción de las características de los programas PERSEO y DIGSILENT en el entendimiento de que son programas que cumplen con los requisitos requeridos para determinar el Plan de Transmisión. Se realiza también una descripción más detallada del software TO/R – MINIMAX.

Por último, se incluye una revisión de los procedimientos para mantener actualizadas las bases de datos de los modelos utilizados para la planificación de la expansión de la transmisión.

C.2 Modelo PERSEO

El modelo de simulación PERSEO es el que actualmente utiliza el OSINERG para los estudios tarifarios. Dicho modelo permite determinar el despacho hidrotérmico de generación que cumple con la función objetivo de minimizar el costo de abastecimiento de la demanda en el horizonte de planificación.

El modelo permite:

- Representar las características del sistema peruano: Multi-embalse, Multi-nodo y Multi-escenario,
- Tener en cuenta el tipo de regulación de las centrales hidráulicas: anual, estacional y diaria
- Representar la demanda en múltiples bloques horarios.
- Simular las paradas por mantenimiento, e indisponibilidad forzada de las unidades generadoras.

- Obtener resultados con una resolución mensual.

Como resultado de la simulación de la operación se obtiene el despacho de cada unidad generadora discriminado por:

- Paso de cálculo (1 mes)
- Banda horaria
- Crónica hidrológica

El modelo incluye una representación simplificada de la red de transmisión resolviendo flujos de carga tipo DC es decir considerando sólo flujos de potencia activa y todas las tensiones de barra igual a 1.0 pu.

Esta característica del modelo permite determinar en forma adicional, con la misma apertura antes indicada, la Energía No Servida (ENS) y los costos marginales de la energía para cada barra del sistema de transmisión, lo que constituye un aspecto saliente del software a los efectos de determinar los atributos de los planes propuestos para determinar el Plan de Transmisión.

Las bases de datos a utilizar en el modelo PERSEO son las que suministró el COES y que se corresponden a las utilizadas por el OSINERG en los estudios para la Fijación de Tarifas de Barra del 2009.

En función de lo antes indicado se concluye que el modelo PERSEO cumple con lo indicado en el literal 18.1.b de LA NORMA y que por lo tanto puede ser utilizado en el presente estudio de planificación.

C.3 Modelo DIGSILENT

El programa DIGSILENT PowerFactory es una herramienta integrada de análisis de sistemas eléctricos compatible con el estado-del-arte en los algoritmos de solución y tecnología avanzada incorporados a una base de datos orientada a objetos.

Actualmente el software DIGSILENT PowerFactory es utilizado por el COES, entre otros, como parte de las herramientas de simulación disponibles para los estudios eléctricos del sistema de transmisión de Perú. Esto hace que se disponga de una base de datos completa del sistema actual la cual será utilizada para los estudios del presente Plan de Transmisión debidamente ajustada para tomar en cuenta escenarios de simulación y planes de transmisión que oportunamente se definan.

El software DIGSILENT PowerFactory incorpora una lista de funciones de simulación que incluye:

- Flujos de carga y Análisis de fallas de una red con una representación completa en CA y CD
- Optimización de redes de distribución

- Dimensionamiento de cables según IEC
- Simulación Dinámica
- Simulación electromagnética (EMT)
- Análisis del comportamiento de protecciones
- Análisis armónico
- Análisis de confiabilidad
- Análisis de estabilidad de voltaje
- Análisis de contingencias
- Modelado de dispositivos de electrónica de potencia
- Interfaz para SCADA/GIS/NIS
- Compatibilidad con otros programas como PSS/E y PSS/U
- Base de datos multi-usuarios
- Herramientas avanzadas: Flujos óptimos de potencia

El software esta desarrollado en un paquete completamente compatible con Windows 95/98/NT/2000/XP.

El DigSILENT PowerFactory es un modelo verticalmente integrado. Esto permite que cada uno de los modelos que lo componen puedan compartir datos y resultados para cualquier función y tipo de análisis y más importante, para categorías de análisis en diferentes sistema, tales como Generación, Transmisión, Distribución e Industrial.

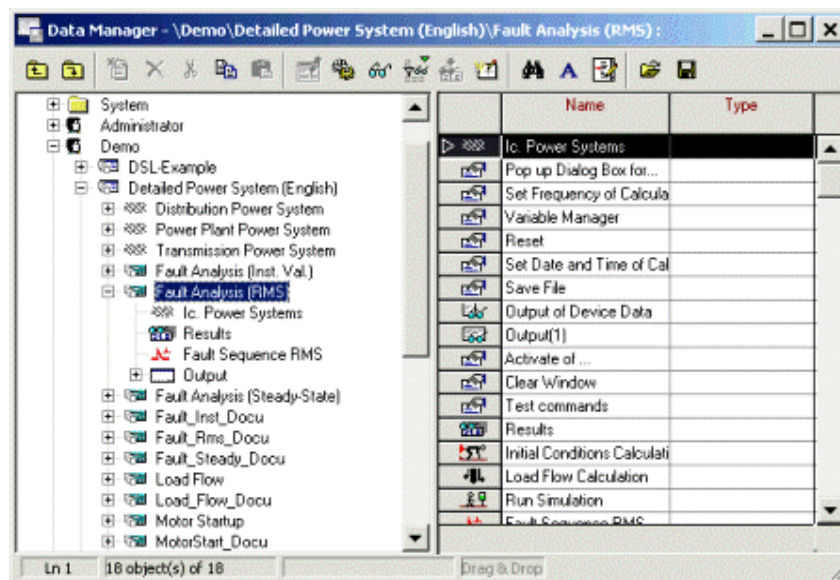


Figura C.1 DigSilent - Estructura Base de Datos.

Con el fin de minimizar la redundancia de datos, los datos son separados en datos de Tipos y de Elementos, de tal manera que el mismo conjunto de datos pueden ser utilizados varias veces mediante unas referencias. Para la mayoría de objetos de la red como cables, motores y relevadores, una librería muy extensa está disponible en el programa, permitiendo que el usuario pueda acceder a ella y la mantenga actualizada.

DIgSILENT PowerFactory brinda un ambiente gráfico totalmente integrado, el cual permite al usuario:

- Dibujar y modificar redes eléctricas representadas mediante diagramas unifilares clásicos, configuraciones de subestaciones permitiendo vistas multi-capas, las cuales permiten visualizar y operar varias ventanas con diferentes redes y capas simultáneamente.
- Utilizar una extensa librería de iconos de los elementos de un sistema (buses, cargas, generadores, etc.), con los cuales es posible dibujar un sistema eléctrico con solo tomar y arrastrar los iconos desde este menú.
- Dibujar y definir diagramas de subestaciones a detalle, tales como: Subestaciones de 1, 2, y 3 barras con o sin bus de transferencia, Barras en forma de U, Esquemas de interruptor y medio, etc.
- Mediante la representación de colores, es posible definir diferentes representaciones para niveles de voltaje, diferentes áreas, bandas operativas de voltajes y sobrecargas, así como cualquier criterio operativo definido por el usuario
- Es posible actualizar, ajustar y comparar diagramas unifilares y definición de casos para garantizando consistencia en las versiones gráficas
- Se puede definir interruptores y desconectores múltiples o sencillos en las subestaciones
- Despliega resultados inmediatamente después de los cálculos directamente en el diagrama unifilar. Todas las variables y señales calculadas, pueden ser desplegadas de acuerdo las necesidades del usuario
- Acceso a la edición de cada uno de los elementos desde el diagrama unifilar mediante un doble clic

C.4 Modelo TO/R con Minimización de Arrepentimiento Máximo

Como parte de este estudio, se entregará al COES una licencia para el software TO/R de Siemens – PTI. El software TO/R ya incorpora herramientas para analizar estos conceptos. LA NORMA (RM 129-2009-MEM/DM) requiere como parte de los estudios para definir el Plan de Transmisión realizar análisis de riesgos,² una parte íntegra de TO/R.

La gestión de riesgos se basa en cuatro conceptos: robustez, exposición, arrepentimiento, y cobertura o “hedging”. Además de lo que TO/R ya tiene, LA NORMA requiere la minimización de arrepentimiento máximo (en adelante MINIMAX, Art. 16.9). El desarrollo de este software será parte del presente estudio.

A continuación se desarrolla la teoría MINIMAX, la cual normalmente se aplica a problemas de optimización (un único objetivo o atributo). Se extiende el concepto a problemas multi-atributo, como el problema de planificación de la transmisión. Se presentan los algoritmos necesarios. Se presentan entonces las especificaciones funcionales para la implementación de los algoritmos en TO/R.

En una sección final presentamos una sobrevista del resto del software TO/R.

C.4.1 MINIMAX: Teoría y Algoritmos

Cuando hay incertidumbres y decisiones, hay riesgos. Esta sección no es una exposición didáctica de la gestión de riesgos. Esto se presentará en uno de los talleres y en trabajos “on the job training.” Aquí se presenta sólo el concepto MINIMAX y su extensión a problemas multi-atributo.^{3,4}

Formulación del Problema

El ejemplo que se presenta a continuación considera cuatro planes mutuamente exclusivos. Quiere decir que el problema es seleccionar uno de ellos. A tal efecto se consideran tres futuros, o materializaciones de las incertidumbres. Para poder demostrar los conceptos en tablas y dibujos de dos dimensiones, se consideran sólo dos atributos. Tanto la teoría como su implementación se aplican a problemas más complejos.

Los atributos del ejemplo son:

² En esta sección usamos términos comunes que también tienen definiciones técnicas particulares y precisas. La mayoría – 13 – están definidas en LA NORMA, Artículo 4, como parte de una lista de 29 términos definidos. Para la comodidad del lector, estas definiciones están incluidas en el Apéndice A de este informe. Sugerimos que el lector repase ligeramente estos términos ahora, y que se refiere a estas definiciones cuando sea necesario para dominar la presentación técnica que sigue.

³ M. Pereira, N. Campodónico, y R. Kelman, “Conceptos de Planeación bajo Incertidumbre.” Seminario, Modelo de Planificación del Modelo SUPER, Managua, mayo 1999.

⁴ E. O. Crousillat, P. Dörfner, P. Alvarado, y H. M. Merrill, “Conflicting objectives and risk in power system planning.” *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 8, No. 3, agosto 1993.

- Inversión (millones de dólares). El objetivo (del Ministerio de Finanzas) es minimizarla para proteger la balanza de pagos – es mayormente dinero que se tiene que gastar afuera del país para conductores de aluminio, equipos de control y compensación, etc.
- Costo total anual (millones de nuevos soles). El objetivo (del MEM y del OSINERG-MIN) es minimizarlo porque el consumidor tiene que pagarlo. Los pagos del consumidor se efectúan en moneda nacional.

Puesto que son dos distintos tipos de dinero, cuyo gasto refleja distintos intereses nacionales, no se pueden sumar. Al contrario, el análisis mantendrá la identidad distinta de los dos atributos. En igual manera, los atributos para planificación de transmisión incluyen mediciones de gestión y confiabilidad que también mantendrán sus identidades distintas.

MINIMAX en Optimización – Un Solo Atributo

La Tabla C.1 (Parte A) presenta la inversión requerida por cuatro planes en tres futuros. En el futuro 1, el plan C requiere la inversión mínima, \$1.2 millones. En el futuro 2, la inversión mínima (\$1.1 millones) se logra con plan C o plan B. En el futuro 3 es el plan B el que minimiza la inversión.

La Tabla C.1 (Parte B) presenta el arrepentimiento por cada plan en cada futuro. Si se escoge el plan A y se materializa el futuro 1, habrá arrepentimiento por no haber escogido el plan C, cuyo valor preciso es la diferencia entre los valores del atributo para los dos planes.

Tabla C.1 Inversión y arrepentimiento.

Parte A				Parte B			
Plan	Futuros			Futuros			máximo
	1	2	3	1	2	3	
A	\$ 3.0	\$ 3.1	\$ 3.2	\$ 1.8	\$ 2.0	\$ 2.4	\$ 2.4
B	\$ 1.6	\$ 1.1	\$ 0.8	\$ 0.4	\$ -	\$ 0.4	\$ 0.4
C	\$ 1.2	\$ 1.1	\$ 0.9	\$ -	\$ -	\$ 0.1	\$ 0.1
D	\$ 2.3	\$ 2.3	\$ 2.3	\$ 1.1	\$ 1.2	\$ 1.5	\$ 1.5
mínima	\$ 1.2	\$ 1.1	\$ 0.8				

Plan C minimiza el arrepentimiento máximo.

En la Tabla C.1, el arrepentimiento es la diferencia entre lo que se invirtió para el plan A y lo que se habría invertido si se hubiese escogido el plan C.

El arrepentimiento para cada plan en cada futuro se calcula en la misma manera, restando de la inversión para el plan en el futuro, la inversión mínima del mismo futuro. Es de notar que si se escoge el plan C y se materializa el futuro 1, el arrepentimiento es cero.

¿Cuál es el arrepentimiento máximo que se puede haber? En el ejemplo el arrepentimiento máximo por escoger el plan A ocurre si se materializa el futuro 3, resultando un valor de \$2.4 millones. De igual manera, el arrepentimiento máximo para el plan B es \$0.4 millones, etc.

¿Cuál de los cuatro planes minimiza el arrepentimiento máximo? Es el plan C, con un arrepentimiento máximo de \$0.1 millones. El plan C no es robusto ya que si ocurre el futuro 3 se tendrá un valor del atributo mayor que si se hubiera elegido el Plan B. Pero *en un sentido, el sentido MINIMAX*, el Plan C es menos riesgoso en cuanto a inversión ya que para cualquier otro plan, el arrepentimiento puede ser superior a \$0.1 millones.

MINIMAX con Problemas Multi-atributo

Las Tablas C.2 y C.3 demuestran lo que puede ocurrir en problemas multi-atributo.

Para el objetivo de minimizar costo total, el plan A minimiza el arrepentimiento máximo. Es el plan de menor costo total en cada futuro. (Si esto fuera un problema de optimización, el plan A sería robusto.)

Desgraciadamente, para el atributo Inversión, el plan A es el peor. Para el atributo costo total el Plan C es el peor y el Plan C es la solución MINIMAX para el atributo inversión.

La Tabla C.4 resume el arrepentimiento máximo para los dos atributos. El cuadro muestra el problema en forma gráfica, y demuestra la solución analítica. Como antes se determinó, el Plan C minimiza el arrepentimiento en cuanto a inversión, y el Plan A lo minimiza en cuanto a costo total.

Tabla C.2 Costo Total (costos fijos y variables).

Plan	1	2	3
A	13	14	11
B	15	19	13
C	30	31	29
D	23	23	23
mínima	13	14	11

Tabla C.3 Arrepentimiento: costo total.

	Futuros			máximo
	1	2	3	
0	0	0	0	0
2	2	5	2	5
17	17	17	18	18
10	10	9	12	12

Plan A minimiza el arrepentimiento máximo.

Pero el Plan B es el menos riesgoso en cuanto a los dos atributos. En cuanto a inversión, es mucho menos riesgoso que el Plan A y sólo un poco peor que el Plan C. En cuanto a costo total, es mucho menos riesgoso que el Plan C y sólo un poco peor que plan A.

En problemas multi-objetivos todas las soluciones (planes) en la curva “frontera” del gráfico son óptimas “en el sentido Pareto”⁵. Se llaman “planes Pareto-óptimos.” Los planes en el codo

⁵ Pareto fue un matemático del siglo 19.

son los más interesantes. Las curvas pueden tener varias formas, y cada forma tiene su propia interpretación.⁴

Tabla C.4 Arrepentimiento Máximo.

Plan	AM: Inversión	AM: Costo Total
A	\$ 2.4	0
B	\$ 0.4	5
C	\$ 0.1	18
D	\$ 1.5	12

El software TO/R incluye gráficos de dos dimensiones para ayudar en visualizar estas relaciones. También tiene algoritmos para identificar los codos para problemas con más que dos atributos, los cuales no se pueden dibujar en dos dimensiones.

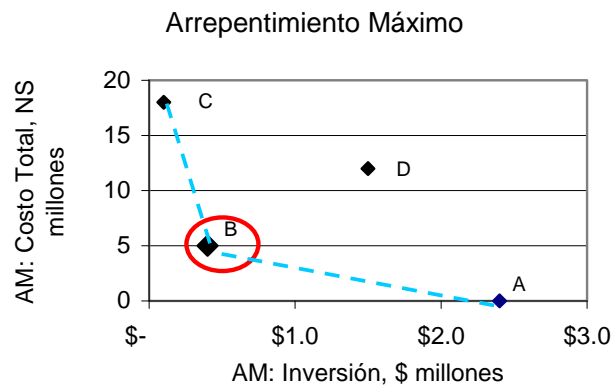


Figura C.4 Conflictos entre MINIMAX para múltiples atributos (objetivos).

C.4.2 MINIMAX: Especificaciones

Implementar MINIMAX solamente para optimización cumple en principio con lo indicado en LA NORMA y con los TDR del presente estudio. En forma complementaria se incorporará en el software TO/R los análisis MINIMAX para problemas multi-atributo.

Insumos

Los insumos requeridos son exactamente los mismos que requiere TO/R para los demás análisis que efectúa. El número máximo de futuros, planes, y atributos para el análisis MINIMAX es igual al número máximo para los análisis normales TO/R.

Sólo se añadirá un registro de control para identificar los atributos para considerar en el análisis MINIMAX. Si el usuario elige sólo un atributo, entonces TO/R efectuará un análisis convencional MINIMAX tipo optimización.

Algoritmos

Los algoritmos para desarrollar el equivalente de la Tabla C.4 serán exactamente los algoritmos que se demostraron arriba – minimizar cada columna (o maximizarla, para atributos que se quiere maximizar, como la confiabilidad), futuro por futuro, calcular el arrepentimiento por restar, y maximizar cada fila de la matriz de arrepentimiento correspondiendo a cada atributo. Las Tablas C.1 – C.4 normalmente serán demasiado grandes para imprimir – puede haber cientos o miles de futuros (columnas) – pero se calcularán y se emplearán en el software. La Figura C.5 es un diagrama de flujos correspondiendo a este software. El software MIN-MAX será incluido como parte del programa RA (análisis de riesgos) del TO/R.

Los algoritmos para identificar el código de la curva frontera ya están incorporados en TO/R y están documentados en la documentación de TO/R y en la literatura. TO/R también contiene funciones para presentar gráficas semejantes a la Figura C.4.

Salidas

El equivalente de la Tabla C.4 es la salida principal del análisis MINIMAX. Gráficos semejantes al de arriba se incluirán.

Documentación y Pruebas

Se añadirá a la documentación actual de TO/R la explicación teórica arriba indicada y la documentación del archivo de control y de los demás archivos afectados.

Se elaborará un caso de prueba para verificar que el software funcione correctamente.

Dimensiones

Las dimensiones para el modelo MINMAX coincidirán con las dimensiones del resto de TO/R, a saber: hasta 13 atributos, hasta 30,000 planes a analizar por cada futuro, y ningún límite explícito en el número de futuros o escenarios a analizar.

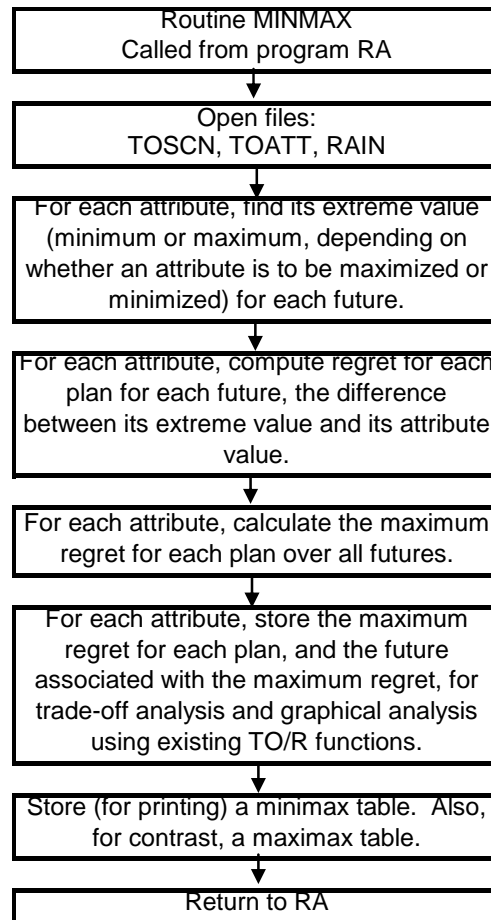


Figura C.5 Diagrama de Flujo, Rutina MINMAX.

C.4.3 El Software TO/R

TO/R es un software comercial de toma de decisiones, adaptado para la planificación en un marco de incertidumbre, como requiere LA NORMA, Artículo 18.1 a). TO/R es propiedad de Siemens – Power Technologies. Fue desarrollado como herramienta para un proceso de planificación tal como lo describen los Títulos IV y VI de LA NORMA. Cumple cabalmente con los requisitos de LA NORMA, por ejemplo como se presentan en el Artículo 16 (en particular, 16.1, 16.3 – 16.7 y 16.9), y el Artículo 18.1 a). TO/R desempeña tres funciones, cada una implementada por medio de un programa independiente, a saber:

- Expansión de base de datos por interpolación lineal por secciones de orden alto (programa DBEXP). Este software tiene como insumos “nudos” o datos simulados, por ejemplo, de estudios hechos con un Modelo para la Simulación de la Operación Económica de Mediano y Largo Plazo, por ejemplo, el software PERSEO. DBEXP usa una variación de programación lineal para interpolar para aproximar valores de atributos por una cantidad demasiado grande de casos para simular. La salida de DBEXP

es una base de datos de atributos para un número grande de escenarios (planes y opciones).⁶

- Análisis trade-off para determinar planes Pareto-óptimos, o sea los que ocupan la superficie de trade-off, especialmente los que están en o próxima a su codo (programa TOA), tal como requiere LA NORMA. Figura N° 4 de LA NORMA tiene tres ejemplos de superficies de trade-off, con sus codos. Figura C.4 de este informe es otro ejemplo. Tal como requiere LA NORMA, Artículo 18.1 a) (ii), la salida de TOA es una lista de planes, por cada futuro, cuya ubicación en la superficie está en o es próxima a un codo de la misma. Esta lista de planes se denomina la lista corta⁷ por un futuro particular.
- Análisis de robustez y riesgos (programa RA). RA determina si hay planes que integran las listas cortas por todas las futuras, o sea que no son dominados en ningún futuro. Si hay, son sin riesgos o robustos.⁸ Se dice también que “son 100% robustos” o “robustos con probabilidad 1.0.” Si no hay planes 100% robustos, RA analiza el grado de robustez de los planes de las listas cortas, medidos en la probabilidad de ocurrir, o el porcentaje de futuros, donde cada plan se encuentra en la lista corta o no-dominado, como requiere LA NORMA, Artículo 16.9 b) (i). El modelo nuevo MINIMAX calculará la exposición al riesgo, tal como la define y la requiere LA NORMA, Artículo 16.9 b) (ii). El resultado estará incorporado en el equivalente de la Tabla C.4, la salida del modelo nuevo MINIMAX. Hay otra medida de riesgo no mencionada en LA NORMA: los futuros de exposición, o sea los futuros para los cuales un plan particular se encuentra dominado o fuera de la lista corta. TOA calcula los futuros de exposición por cada plan.

Tal como requiere LA NORMA (Artículo 18.1 a) (i), los insumos principales para el software TO/R son conjuntos de:

- Opciones,
- Planes,
- Atributos,
- Incertidumbres,
- Futuros, y
- Escenarios.

⁶ Atributos, escenarios, futuros, y planes son definidos en LA NORMA, Artículos 4.1, 4.6, 4.7, y 4.17.

⁷ LA NORMA, Artículo 4.12.

⁸ Dominancia, riesgo, y robustez son definidos en LA NORMA, Artículos 4.4, 4.19 y 4.20. Hay que aclarar que la definición de riesgo en LA NORMA es correcta pero incompleta. Habla del “azar en términos monetarios.” Obviamente esta definición tiene solo que ver con atributos monetarios. También hay riesgos en cuanto a atributos no-monetarios, tales como los mencionados en los Artículos 11.1 y 11.2 y en la Figura 3 de LA NORMA. Para un atributo no-monetario, el riesgo es “el azar en los términos no-monetarios del atributo,” etc.

C.4.4 Procedimientos para Actualización de las Bases de Datos

Respecto al tema relacionado a la continua manutención de las bases de datos de los modelos utilizados para la planificación de transmisión, se revisó el informe del estudio de planificación realizado para OSINERGMIN, es especial, la sección 6 del informe “Modelo para la Planificación y Expansión de los Sistemas de Transmisión” de 17 de febrero de 2007.

Las recomendaciones presentadas en el mencionado informe, en la opinión del CONSULTOR, están de acuerdo a las necesidades para las tareas de planificación de la expansión.

Referencias

- [1]: Anuario Estadístico de Electricidad 2008. Ministerio de Energía y Minas
- [2]: Estadística de Operaciones 2008. COES SINAC
- [3]: Plan Referencial de Electricidad 2008-2017. Ministerio de Energía y Minas
- [4]: Informe de Diagnostico de las condiciones operativas del SEIN, periodo 2011 – 2020. COES SINAC
- [5]: Plan de Expansión del Sistema de Transmisión de REP 2008 – 2016. Red Eléctrica del Perú S.A. Septiembre 2008.