

**Programa Computacional y Modelo de Estimación del Costo Total del
Plan de Reducción de Pérdidas No Técnicas
Convenio Específico No. 1 del Convenio Interadministrativo 2010-0137**

**Universidad Tecnológica de Pereira (UTP)
Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)
Informe Final**

Harold Salazar Isaza, PhD
Profesor Asociado
Programa de Ingeniería Eléctrica
Universidad Tecnológica de Pereira
Vereda La Julita, A.A. 97, Pereira
Email: hsi@utp.edu.co
Tel: (6)-3137122 Ext. 111

Última actualización: Abril 11 del 2011 (Versión 3.0)

Contenido del Informe

Resumen

1. Introducción
 - 1.1. Primera categoría – Cambios al modelo teórico
 - 1.2. Segunda categoría – Cambios al programa computacional
 - 1.3. Resumen de los cambios implementados en este convenio
2. Modelo de Disminución de Pérdidas y Estimación del Costo Total de un Plan de Reducción de Pérdidas como un Problema de Programación Dinámica
3. Cálculo Analítico de los Beneficios de un Programa de Disminución de Pérdidas
 - 3.1. Conceptualización gráfica de los beneficios de un plan de disminución de pérdidas
 - 3.2. Balances energéticos
 - 3.3. Beneficios del plan de disminución de pérdidas
 - 3.4. Cálculo de la energía recuperada y energía vendida a partir de las pérdidas estimadas
4. Red Neuronal como Estimador de Pérdidas
 - 4.1. Descripción de la red neuronal
 - 4.2. Resultado del entrenamiento
 - 4.3. Pruebas de entrenamiento y generalización
5. Descripción del Programa computacional
 - 5.1. Restricciones al árbol de decisión implementadas en el software
 - 5.2. Soporte técnico del programa Computacional
6. Manual de Usuario (Como documento aparte)

Resumen

Este informe presenta los cambios teóricos realizados al modelo de reducción de pérdidas técnicas y no técnicas atendiendo los comentarios recibidos por los operadores de red-comercializadores y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) al informe del convenio No. 3 del Convenio Interadministrativo del 23 de Noviembre del 2009, convenio en el cual se desarrolló un modelo y programa computacional para determinar los costos de un programa de disminución de pérdidas. Así mismo, este informe detalla los cambios realizados a la red neuronal y se proporciona mayor información de la misma, esto con el fin de dar respuesta a solicitudes dirigidas en tal sentido. Finalmente, y como un cambio sustancial frente al trabajo anterior, este convenio desarrolla un nuevo programa computacional de mayor funcionalidad, mejor capacidad de cómputo (lo cual permite analizar árboles de decisión con mayor número de inversiones) y mejores tiempos de respuesta. Los detalles técnicos del programa se describen en este informe. El manual de usuario se entrega como documento independiente.

1. Introducción

Una vez realizada la entrega del modelo de reducción de pérdidas y el programa computacional para el cálculo de los mismas, realizados por la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) en convenio suscrito con la Comisión de Regulación de energía y Gas (CREG), y una vez recibidos los comentarios por parte de la operadores de red-comercializadores (C-OR) y la CREG, se procede a desarrollar un nuevo convenio básicamente con dos propósitos: 1) Ajustar el modelo teórico en los aspectos señalados en los comentarios, y 2) Elaborar un nuevo programa computacional de mayor desempeño computacional y funcionalidad.

Para dar cumplimiento a estos propósitos, los comentarios de los C-OR y las sugerencias de la CREG se dividieron en dos categorías acorde con los alcances del nuevo convenio. Una primera categoría reúne los distintos comentarios relacionados con el modelo matemático desarrollado para estimar la senda y el costo del programa de disminución de pérdidas; por otro lado, la segunda categoría agrupa comentarios relacionados con el programa computacional. A continuación se describen ambas categorías.

1.1. *Primera categoría - Cambios al modelo teórico*

Antes de mencionar aspectos generales de esta primera categoría, se destaca el hecho que existe un consenso respecto al modelo de optimización propuesto (programación dinámica) como herramienta para determinar la senda de máximos beneficios y mínimo costo, esto es, sobre esta técnica no existió comentario alguno y por tal motivo ese aspecto no se sometió a revisión y como tal se conserva en el modelo actual.

Detallando aspectos de la primera categoría, los comentarios estaban dirigidos principalmente al cálculo de los beneficios en concreto la ausencia de la elasticidad en una de las ecuaciones. Si bien esta omisión se subsanaba incluyendo la elasticidad en la ecuación, se estableció que era *preciso revisar los supuestos del modelo* con el fin de detectar la razón de esa omisión. Efectivamente, se determinó que el modelo anterior desarrollaba las ecuaciones de beneficios ignorando los efectos del plan en el aumento de la facturación, razón por la cual no se incluyó la elasticidad en la ecuación.

Como consecuencia de la revisión de los supuestos, se evidencia la necesidad de replantear un nuevo modelo el cual *incluya de forma explícita* todos los beneficios del plan (ahorro en compra y aumento en facturación). Este nuevo enfoque, el cual se considera de mayor acierto, permitió derivar analíticamente los beneficios de un plan de disminución de

pérdidas en donde la presencia de la elasticidad aparece como parte de un desarrollo matemático, coincidiendo con la experiencia y comentarios de los C-ORs. Esto es, se atiende el comentario a través de un análisis matemático.

De igual manera, la nueva conceptualización implicó reformular el cálculo de la energía recuperada la cual anteriormente se calculaba a través de una diferencia de áreas, para este modelo, esta energía, se determina a través de un sistema de ecuaciones lineales. Este nuevo modelo y sus respectivos cálculos se considera un enfoque más preciso pues los supuestos parten de una situación más realista. En su esencia, la ruta de máximo beneficio y menor costo se siguen calculando con un modelo de programación dinámica; sin embargo, el cálculo de los beneficios corresponde a una nueva conceptualización derivada a partir de un enfoque producto de los comentarios recibidos.

Por otro lado, y como una segunda componente dentro de la primera categoría, la estimación de pérdidas a través de la red neuronal igualmente fue sujeta a revisión. Con el ánimo de atender el hecho que la anterior red neuronal incluía energía en tránsito que afectaba la estimación del nivel de pérdidas, la comisión depuro la base de datos excluyendo estas energías, esta nueva base de datos sirvió como referente para entrenar nuevamente la red neuronal. Con esto se atiende la solicitud de excluir cualquier energía en tránsito. La arquitectura de la red neuronal (número de entradas y número de nodos en la capa oculta) igualmente fue revisada y rediseñada. Esto con el objeto de lograr una mejor estimación para niveles bajos de inversión, esto es, la anterior red neuronal no captura el hecho que para bajos niveles de inversión las pérdidas del sistema se incrementan. Esto explica algunos resultados no coherentes que entregaba el modelo anterior. Este aspecto igualmente fue corregido. En la sección 4 se detalla este comportamiento y se suministran los parámetros internos de la red neuronal. Con estos parámetros es posible replicar el comportamiento de la red y con ello se da respuesta a comentarios los cuales solicitaba conocer detalles internos de la red neuronal.

1.2. Segunda categoría - Cambios al programa computacional

Tal como se señaló al inicio de la introducción, en la segunda categoría se solicitan básicamente mejoras al programa computacional. En este asunto, el interés de la comisión era disponer de una nueva herramienta computacional de mejor desempeño computacional y más funcional, en termino concretos, se deseaba desarrollar un programa que permitiera analizar arboles de decisión con un mayor número de opciones de inversión, con menores tiempos computacionales y más amigable para el usuario final. Para trabajar en este

aspecto, este convenio cambio completamente el enfoque de elaboración del programa computacional.

El nuevo programa computacional está desarrollado bajo un ambiente cliente servidor. El servidor es un supercomputador Silicon Graphics SGI RASC Altix-350 ubicado en el centro de alto desempeño computacional de la Universidad Tecnológica de Pereira. Este servidor permite procesamiento en paralelo lo cual se traduce en mejoras sustanciales de tiempo de procesamiento. Con estas características es posible ejecutar, por ejemplo, un árbol de decisión de 7 inversiones para un periodo de ocho años en un minuto, para tener un referente, este árbol, en el programa desarrollado en el convenio anterior, tardaba aproximadamente treinta minutos. El centro de alto desempeño cuenta con varios canales de comunicaciones lo cual garantiza completa accesibilidad al servidor. Con este programa se pueden ejecutar árboles de hasta 30 inversiones (nuevamente, como referente, el programa anterior estaba limitado a 7 inversiones). Con un mayor número de inversiones se tiene la posibilidad de analizar una mayor cantidad de planes de disminución de perdidas.

De igual manera, el nuevo programa computacional tiene un manejo de archivos más amigable y una interfaz más intuitiva. Con todas estas características no solo se mejoran las capacidades computacionales sino que se atienden los requerimientos de los ORs. Detalles de los elementos técnicos del programa se muestran en la sección 5. El manual de usuario corresponde a la última sección de este informe pero se entrega como documento aparte, en este se explica el uso del programa computacional. Igualmente, el manual puede ser descargado directamente del sitio web.

1.3. Resumen de los cambios implementados en este convenio

Con los elementos descritos anteriormente, los cambios más significativo con respecto al primer convenio son los siguientes:

- Nuevo modelo conceptual para el cálculo de los beneficios.
- Nueva formulación para el cálculo de la energía recuperada.
- Nueva base de datos de entrenamiento la cual excluye energías en tránsito.
- Rediseño y reentrenamiento de la red neuronal.
- Nuevo programa computacional en arquitectura cliente-servidor.
- Mejores tiempos de respuesta del programa computacional.

- Interfaz de datos y archivo de salida más amigables.

Por último, la organización de este informe es la siguiente. En la sección 2 se recuerdan los elementos más importantes del modelo para determinar la ruta de máximo beneficio y menor costo, esto con el fin de retomar algunos elementos necesarios para las siguientes secciones. En la sección 3 se plantea el nuevo enfoque para el cálculo de los beneficios. A partir de este enfoque se derivan analíticamente los beneficios de un programa de disminución de pérdidas así como la energía recuperada, año a año, del plan. La sección 4 muestra el diseño y detalla la estructura y comportamiento de la red neuronal. Por último, en la sección 5 se describen algunos elementos del programa computacional incluyendo el soporte técnico que será brindado por la Universidad. El manual de uso del portal web se entrega como documento aparte.

2. Modelo de Disminución de Pérdidas y Estimación del Costo Total de un Plan de Reducción de Pérdidas como un Problema de Programación Dinámica

El objetivo de esta sección es recordar algunos elementos desarrollados en el convenio anterior y que se consideran necesarios para entender los cambios al modelo. Estos cambios se detallan en la siguiente sección. Por lo pronto, es preciso recordar que el modelo de reducción de pérdidas no técnicas es considerado como un problema de programación dinámica en donde la ruta óptima y de menor costo se determinan sobre un árbol de decisión.

En la figura 2.1 se muestra un nodo genérico del árbol de decisión. En esta figura, $\Delta P(y_k, t_j)$ representa el nivel de pérdidas alcanzado en el estado y_k , al final del año t_j , cuando a lo largo de ese año se realizan unas inversiones y gastos destinados al plan de recuperación de pérdidas denotadas como I_k (en \$/kWh). Es preciso recordar que un estado, representado gráficamente como un nodo, en este modelo, es un nivel de pérdidas alcanzados al final del año t_j , entonces, cada posible inversión y gasto realizado durante el año t_j define un nivel de pérdidas (estado) al final del año. Es posible que el nivel de pérdidas al final del año t_j sea de mayor o menor magnitud que el nivel de pérdidas al inicio del año, esto es, que el nivel a principio del año, denotado como $\Delta P(x, t_i)$, ello depende del valor de las inversiones.

Tal como se explico en el modelo desarrollado en el convenio anterior, cada nivel de

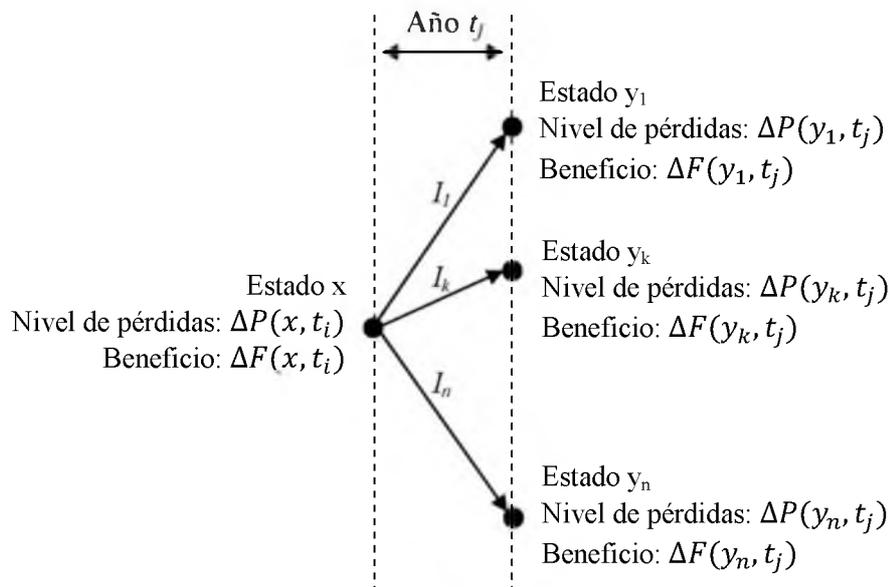


Figura 2.1. Valores que caracterizan a los diferentes estados (nodos) en el árbol de decisión

pérdida (estado) se manifiesta a través de unos beneficios. Dos beneficios, los cuales serán derivados analíticamente en la sección 3, resultan del plan de disminución de pérdidas. En otras palabras, cambiar el nivel de pérdidas al final del año t_b , denotado como $\Delta P(x, t_i)$, a un nivel de pérdidas al final año t_j , en particular para el estado y_k , produce dos beneficios financieros. Denote estos beneficios como $\Delta F_1(y_k, t_j)$ y $\Delta F_2(y_k, t_j)$ los cuales corresponde a los cambios en el flujo de caja (razón que explica su nombre) producto del aumento en las ventas de energía y ahorro en compra de energía. Con estos beneficios, los beneficio totales, para el estado y_k , están dados por

$$\Delta F(y_k, t_j) = \Delta F_1(y_k, t_j) + \Delta F_2(y_k, t_j) + \Delta F(x, t_i) \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1), el último término implica que los beneficios son acumulativos a través del tiempo, esto es, este modelo considera que los beneficios no solo se manifiestan por acciones durante el año en curso sino por acciones pasadas que conducen al sistema (operador de red) a tener un nivel de pérdidas determinado. Dados los beneficios totales, cada nodo del árbol de decisión entonces se caracteriza por los valores mostrados en la figura 2.1. Como se explica más adelante (capítulo 3), existe una relación analítica entre el nivel de pérdidas y el beneficio en cada nodo del árbol de decisión, esto es, entre los valores que caracterizan el nodo.

Asuma que los valores característicos son conocidos para cada estado del sistema, la ruta óptima de disminución de pérdidas, es decir, la ruta que maximiza los beneficios del plan es aquella que se obtiene al aplicar de forma recursiva la ecuación (2.2)¹.

$$VP(x, t_i) = \max_k \left\{ -I_k \times EV(y_k, t_j) + \frac{\Delta F(y_k, t_j)}{(1+r)} + \frac{VP(y_k, t_j)}{(1+r)} \right\} \quad (2.2)$$

En la ecuación anterior, $VP(x, t_i)$ denota el valor presente de futuros flujos de caja para el estado x al final del tiempo t_b , I_k las inversiones y gastos (en \$/kWh) destinadas al plan de disminución de pérdidas, $EV(y_k, t_j)$ son las ventas de energía totales durante el año t_j para el estado y_k , $\Delta F(y_k, t_j)$ los beneficios definidos en la ecuación (2.1) y finalmente, $VP(y_k, t_j)$ los futuros flujos de caja para el estado y_k posteriores al año t_j . Es preciso indicar que el operador *max* precedido por los corchetes indica que se selecciona el mayor elemento de un conjunto de datos, en donde, cada dato, para este problema, son los valores definidos por cada estado y_k . De manera similar, la ecuación (2.2) asume que los beneficios

¹ Esta ecuación es básicamente la aplicación de la ecuación de optimalidad de Bellman. Para mayor claridad se recomienda mirar el documento del convenio anterior.

de un estado se manifiestan al final del año y por ello se descuentan, sin embargo, puesto que los gastos se van realizando durante el año, estos no se descuentan, lo cual explica que el primer termino dentro del corchete de la ecuación (2.2) no está multiplicado por el factor de descuento mientras que efectivamente se multiplica por ese factor.

El árbol de decisión establecido de la conexión de diferentes nodos como los mostrados en la figura 2.1 permite igualmente determinar la *ruta de menor costo*. Para explicar cómo se determina el costo de una ruta, considere, sin pérdidas de generalidad, un árbol conformado por dos años y tres inversiones tal como el que se muestra en la figura 2.2. Los valores al final del año 2 representan las pérdidas en los diferentes estados y las ventas de energía en esos estados, esto es, $\Delta P(y_k, t_2)$ y $EV(y_k, t_2)$ respectivamente. Asuma por lo pronto que esas cantidades son conocidas (mas detalles en la sección 3.4). Suponga que el operador de red desea estimar el costo para alcanzar cierto nivel de pérdidas, para el caso de la figura 2.2, asuma que se desea conocer el costo de alcanzar el estado y_4 en el año 2. El costo del plan asociado a esta ruta es:

$$C(y_4, t_2) = I_2 \times EV(y_2, t_1) + \frac{1}{(1+r)} I_1 \times EV(y_4, t_2) \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3), $C(y_4, t_2)$ representa el costo total para alcanzar el nivel de pérdidas $\Delta P(y_4, t_2)$. Note que este nivel corresponde a las inversiones y gastos destinados al

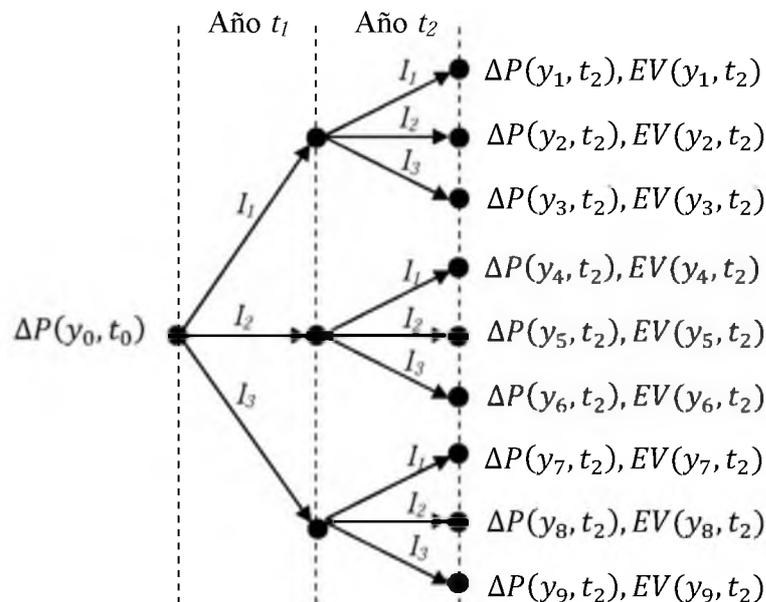


Figura 2.2. Árbol de decisión de dos años y tres inversiones

programa de disminución de pérdidas multiplicado por las ventas de energía año por año. En el caso específico de la ecuación (2.3), el primer término del lado derecho de la igualdad corresponde a las ventas de energía del año 1 ($EV(y_2, t_1)$) multiplicado por las inversiones destinadas al plan durante ese año (I_2) más el valor presente de las ventas de energía del año 2 ($EV(y_4, t_2)$) multiplicado por las inversiones y gastos destinados al plan durante el segundo año (I_1).

Suponga que el operador de red-comercializador desea alcanzar un nivel de pérdidas al final del año 2 de la figura 2.2 el cual está dado por dos estados, por ejemplo, el estado 2 y 7, esto es, ambos estados tienen igual nivel de pérdidas $\Delta P(y_2, t_2) = \Delta P(y_7, t_2)$. El **costo total del plan de disminución de pérdidas**, correspondiente a la variable $CPCE$ de la resolución en consulta 184 del 2010, está dado por

$$CPCE = \min\{C(y_2, t_2), C(y_7, t_2)\} \quad (2.4)$$

La ecuación (2.4) significa que el $CPCE$ corresponde a la ruta de menor costo para alcanzar el nivel de pérdidas deseado. Note que para el cálculo del $CPCE$ se requieren los siguientes aspectos:

- Determinar todos los estados (nodos) cuyo nivel de pérdidas sean iguales al valor deseado.
- Calcular el costo asociados a cada ruta que llevan a los estados identificados en el punto anterior.
- Establecer el mínimo valor de todos los costos.

En términos generales, la variable $CPCE$ que entrega el programa computacional está dada por:

$$CPCE = \min_{k \in \Omega} \{C(y_k, t_5)\} \quad (2.5)$$

En donde Ω representa el conjunto de estados cuyas pérdidas son iguales al valor deseado en el último año del periodo de estudio (o dentro de un rango) y $C(y_k, t_5)$ es el costo de alcanzar el estado k (que pertenece al conjunto Ω) en el año 5, el cual es el último año del plan.

Otra variable que sirve de referencia cuando se analizan varios planes de disminución de pérdidas y calculada por el programa computacional es la variable IEA la cual significa

Ingreso Equivalente Anualizado de un plan de disminución de pérdidas. Esta variable se determina a partir de la variable $CPCE$. Este valor es la inversión constante (\$/kWh) las cuales, con las ventas de energía calculadas de la ruta de menor costo, producen igual valor de $CPCE$. Para el ejemplo en desarrollo, suponga que el mínimo costo de la ecuación (2.4) está dado por el estado 7, entonces

$$\begin{aligned}
 CPCE &= \min\{C(y_2, t_1), C(y_7, t_2)\} = C(y_7, t_2) \\
 CPCE &= I_3 \times EV(y_3, t_1) + \frac{1}{(1+r)} I_1 \times EV(y_7, t_2) \\
 IEA &:: \frac{CPCE}{EV(y_3, t_1) + \frac{1}{(1+r)} EV(y_7, t_2)}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Note que este valor es un referente el cual determinar unas inversiones constantes durante el plan de de pérdidas. En términos generales, la variable IEA que entrega el programa computacional está dada por:

$$IEA = \frac{CPCE}{\sum_{i=0}^s \frac{EV(y_{\Omega^*}, t_i)}{(1+r)^i}} \tag{2.7}$$

En donde Ω^* denota los estados que definen la ruta de menor costo.

Finalmente, es preciso recordar que el modelo requiere dos elementos necesarios para su ejecución. El primero es el horizonte de tiempo, este modelo por defecto está programado para un horizonte de cinco años de acuerdo a las indicaciones de las resolución en consulta 184 del 2010. El segundo aspecto son los futuros flujos de caja en los estados terminales del árbol de decisión, esto es, en el quinto año. Este modelo asume a partir del quinto año no hay dinero asociados al plan de disminución, tal como se indica en la resolución en consulta 184 del 2010, y por tanto no existen futuros flujos de relacionados con este aspecto, esto es, matemáticamente los valores $VP(y_k, t_5) \forall y_k$ son cero.

Con los elementos indicados en esta sección, el algoritmo para determinar la ruta de máximos beneficio y menor costo es la siguiente:

1. Establecer el árbol de decisión según el número de inversiones y el horizonte de tiempo
2. Estimar las pérdidas con la red neuronal. Detalles en la sección 4.
3. Con las pérdidas estimadas en 2, calcular la energía recuperada y los beneficios. Detalles en la sección 3.
4. Determinar los valores presentes de futuros flujos de caja, esto es, aplicar la ecuación (2.2) iniciando desde los nodos terminales.
5. Con los valores de los puntos 3 y 4, establecer la ruta de máximo beneficio y la ruta de menor costo.
6. Con la ruta de menor costo, determinar las variables *CPCE* e *IEA* con las ecuaciones (2.5) y (2.7).

Si bien la estructura descrita es igual a la del convenio anterior (el modelo es finalmente el mismo problema de programación dinámica), los numerales 2, 3 y 4 corresponde a una nueva formulación atendiendo comentarios enviados por los operadores de red al igual que sugerencias indicadas por la CREG.

3. Cálculo Analítico de los Beneficios de un Programa de Disminución de Pérdidas

3.1. Conceptualización gráfica de los beneficios de un plan de disminución de pérdidas

Considere la figura 3.1 la cual muestra el efecto de recuperación de las pérdidas técnicas y no técnicas entre dos años consecutivos. Esta figura servirá de base para establecer los beneficios económicos que se derivan al disminuir tales pérdidas y necesario para el modelo. La figura 3.1 asume que el C-OR se encuentra en el estado x en el tiempo t_i y que a lo largo del año t_j realiza una inversión y gasto destinados al plan de tal forma que al final de ese año el sistema se encuentra en el estado y_k . En otras palabras, las energías mostradas en la figura 3.1 corresponden a la conceptualización descrita en la figura 2.1.

La definición de las variables mostradas en la figura 3.1 son las siguientes²:

Para el año t_i

$EC(x, t_i)$: Energía comprada por el C-OR en el estado x durante el año t_i

$EV(x, t_i)$: Energía vendida por el C-OR en el estado x durante el año t_i

$PR(x, t_i)$: Pérdidas reconocidas por la CREG en el estado x durante el año t_i

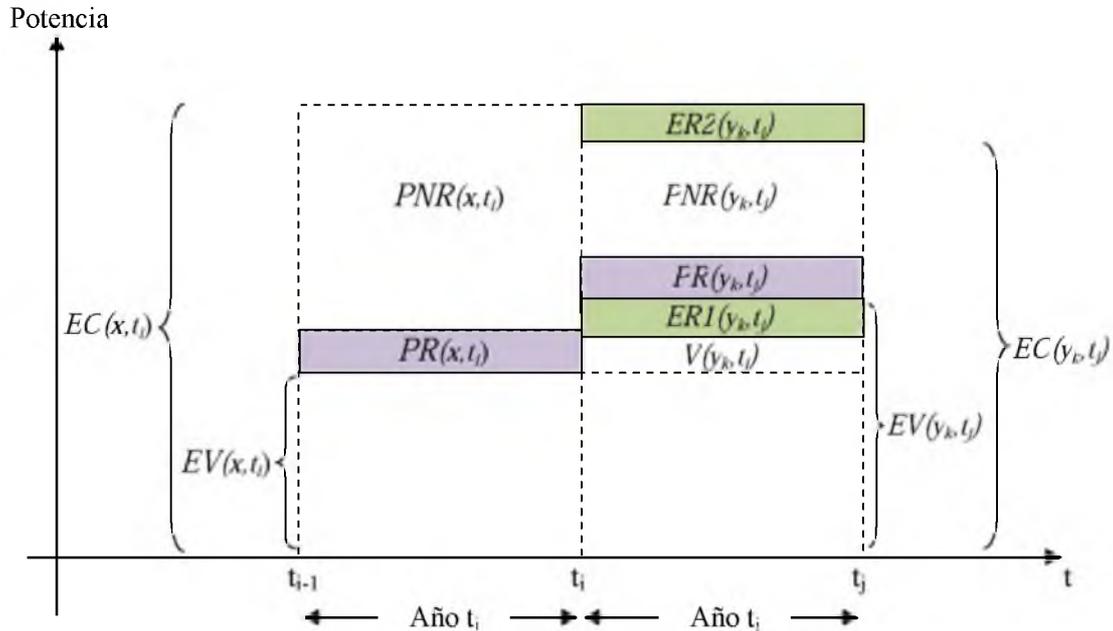


Figura 3.1. Efecto de un plan de disminución de pérdidas de energía entre dos años consecutivos

² Aquí se asume que la energía comprada es la energía que entra al sistema del operador de red **excluyendo** cualquier energía en tránsito.

$PNR(x, t_i)$: Pérdidas no reconocidas por la CREG en el estado x durante el año t_i

Para el año t_j

$EC(y_k, t_j)$: Energía comprada en el estado y_k durante el año t_j

$EV(y_k, t_j)$: Energía vendida en el estado y_k durante el año t_j

$V(y_k, t_j)$: Crecimiento vegetativo en el estado y_k durante el año t_j

$ER1(y_k, t_j)$: Energía recuperada, como producto del plan de disminución de pérdidas, que se hace **efectiva en el incremento de las ventas** en el estado y_k durante el año t_j

$PR(y_k, t_j)$: Pérdidas reconocidas por la CREG en el estado y_k durante el año t_j

$PNR(y_k, t_j)$: Pérdidas no reconocidas por la CREG en el estado y_k durante el año t_j

$ER2(y_k, t_j)$: Energía recuperada, como producto del plan de disminución de pérdidas, que se hace **efectiva en la disminución de compras de energía** en el estado y_k durante el año t_j

Si bien en la representación de la figura anterior no aparece de forma explícita los niveles de pérdidas de los estados x y y_k ($\Delta P(x, t_i)$ y $\Delta P(y_k, t_j)$), su relación con las diferentes variables de la figura 3.1 se deducirá en la sección 3.2.

3.2. Balances energéticos

Tal como lo indican las variables $ER1(y_k, t_j)$ y $ER2(y_k, t_j)$ en la figura 3.1, este modelo asume que los efectos del plan de disminución de pérdidas se manifiestan en dos sentidos: 1) incremento en las ventas de energía y 2) disminución en compras de energía comprada. Sobre estos efectos existe un amplio consenso por lo cual no es necesario una justificación. Sin embargo, para la construcción del modelo es preciso derivar analíticamente los beneficios económicos que producen estos dos efectos. Note que la conceptualización del efecto del plan de disminución de pérdidas es diferente al realizado en el convenio anterior pues allí no consideraba de forma explícita el incremento de las ventas debido al plan.

Considere nuevamente la figura 3.1. De esta figura se deduce el siguiente balance para el año t_j :

$$EC(x, t_j) = EV(x, t_j) + PR(x, t_j) + PNR(x, t_j) \quad (3.1)$$

La ecuación (3.1) indica que las compras de energía ($EC(x, t_j)$) es igual a las ventas de energía ($EV(x, t_j)$) más las pérdidas reconocidas ($PR(x, t_j)$) y las no reconocidas ($PNR(x, t_j)$). De manera similar, el balance energético para el año t_j es:

$$EC(y_k, t_j) = EV(y_k, t_j) + PR(y_k, t_j) + PNR(y_k, t_j) \quad (3.2)$$

La ecuación (3.2) tiene igual interpretación que la ecuación (3.1) y muestra el balance de energía en función de las ventas y las pérdidas reconocidas y no reconocidas en el año t_j .

Los beneficios económicos del plan de disminución de pérdidas se determinan a partir de comparar los efectos del plan con respecto a “no hacer nada”, esto es, con respecto a no implementar un plan. Para este propósito, es necesario relacionar diferentes cantidades que intervienen en los balances energéticos. Considere la relación que existe entre la energía vendida entre los años t_i y t_j , mostrada en la ecuación (3.3), y derivada a partir de la figura 3.1.

$$EV(y_k, t_j) = EV(x, t_i) + V(y_k, t_j) + ERI(y_k, t_j) \quad (3.3)$$

Esta ecuación indica que la energía vendida en t_j ($EV(y_k, t_j)$) es igual a las ventas de energía en el año anterior ($EV(x, t_i)$), más el crecimiento vegetativo de la demanda ($V(y_k, t_j)$) y los beneficios en el incremento de las ventas para el año t_j ($ERI(y_k, t_j)$). Note que no implementar el plan se traduce, según la ecuación (3.3), en unas ventas producto únicamente de un crecimiento vegetativo.

Por otro lado, la ecuación (3.4) relaciona las compras de energía entre dos años consecutivos y derivada a partir de la figura 3.1. Note que esta ecuación hace explícito la disminución de compras de energía producto del plan.

$$EC(y_k, t_j) = EC(x, t_i) - ER2(y_k, t_j) \quad (3.4)$$

3.3. Beneficios del plan de disminución de pérdidas

Considere ahora el costo unitario definido en la resolución CREG 119 del 2007 y actualmente vigente. El CU, según la resolución, está dado por:

$$CU = G + T + D + C_v + PR + R \quad (3.5)$$

Para efectos de esta derivación se ignoran las componentes PR y R puesto que estas componentes no inciden en los beneficios. Considere ahora los ingresos por ventas de un comercializador-operador de red (C-OR) en el año t_j , estos se obtiene al multiplicar las ventas de energía por el respectivo CU tal como se muestra en la ecuación (3.6).

$$\begin{aligned}
 CU \times EV(y_k, t_j) &= (G + T + D + C) \times EV(y_k, t_j) \\
 &= (G + T)EV(y_k, t_j) + (D + C)EV(y_k, t_j)
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Note que el término $(G + T)EV(y_k, t_j)$ no corresponde a un beneficio pues estos son trasladados directamente a los generadores y transportadores. Por otro lado, el último término de la ecuación (3.6) se muestra en la ecuación (3.7) y en el cual $EV(y_k, t_j)$ se ha sustituido por la ecuación (3.3).

$$\begin{aligned}
 (D + C) \times EV(y_k, t_j) &= (D + C) \left(EV(x, t_i) + V(y_k, t_j) + ERI(y_k, t_j) \right) \\
 &= (D + C) \left(EV(x, t_i) + V(y_k, t_j) \right) + (D + C) ERI(y_k, t_j)
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Note que el término $(D + C) \left(EV(x, t_i) + EV(y_k, t_j) \right)$ corresponde a las ventas energía en caso de no implementar un plan de disminución de pérdidas, esto es, son los ingresos frente a no hacer nada. Por otro lado, el término $(D + C)ERI(y_k, t_j)$ indica los ingresos adicionales producto de la implementación del plan, por lo tanto, esta componentes es la que resulta frente al hecho de no hacer nada. Sin embargo, por indicaciones de la CREG, la componente C se excluye de este beneficio pues esta componente se actualiza anualmente en función de la energía vendida el año anterior, lo cual implica que la componente explícitamente está reconociendo cualquier acción encaminada a recuperar las pérdidas. Por otro lado, igual por comentarios de la comisión, puesto que este costo representa alrededor de un 10% del CU, la comisión considera que su eliminación no representa cambio sustancial en los resultados del modelo. Por consiguiente, los beneficios por incremento por facturación se definen como

$$\text{Beneficios1} = D \times ERI(y_k, t_j)
 \tag{3.8}$$

Considere por otro lado los beneficios derivados por ahorro en compra de energía. La energía pagada que ingresa por las fronteras del C-OR para el año t_j está dada por la ecuación (3.9), esto es:

$$(G + T)EC(y_k, t_j)
 \tag{3.9}$$

De forma similar a la derivación de los beneficios1, la idea es comparar frente al caso de no

hacer nada. Para este propósito, se sustituye el término $EC(y_k, t_j)$ de la ecuación anterior por el indicado en la ecuación (3.4), esto es

$$\begin{aligned}(G+T)EC_y &= (G+T)(EC(x, t_i) - ER2(y_k, t_j)) \\ &= (G+T)EC(x, t_i) - (G+T)ER2(y_k, t_j)\end{aligned}\quad (3.10)$$

Note que el primer término, $(G+T)EC(x, t_i)$ es el valor de compras de energía en el año t_i en caso de no implementar el plan de disminución de pérdidas. Por otro lado, el término $(G+T)ER2(y_k, t_j)$ es un egreso negativo lo cual, visto como un flujo de caja, es un ahorro pues corresponde a un dinero que se deja de pagar³. Por lo tanto, los beneficios por ahorro en compras de energía son:

$$Beneficios2 = (G+T)ER2(y_k, t_j) \quad (3.11)$$

Observe que las ecuaciones (3.8) y (3.11) denotan los beneficios por facturación y por ahorro en pagos respectivamente. De igual forma, estas ecuaciones parten de la estimación de los valores de energía recuperada en el año, es decir, $ER1(y_k, t_j)$ y $ER2(y_k, t_j)$. Por lo general, en un plan de reducción de pérdidas se tiene una estimación de la energía total recuperada, denote este valor como $ER(y_k, t_j)$, matemáticamente definido como:

$$ER(y_k, t_j) = ER1(y_k, t_j) + ER2(y_k, t_j) \quad (3.12)$$

Para determinar los valores de $ER1(y_k, t_j)$ y $ER2(y_k, t_j)$ a partir de $ER(y_k, t_j)$, (el valor total estimado), se asume que la demanda es elástica frente a un plan de recuperación⁴. Denote como k el valor de la elasticidad, entonces, la fracción de la energía recuperada que se hace efectiva en el incremento en facturación y el ahorro en compra de energía son respectivamente, las siguientes

$$ER1(y_k, t_j) = k ER(y_k, t_j) \quad (3.13a)$$

³ Note que no implementar el plan implica que $ER2(y_k, t_j)$ es igual a cero, en tal caso $EC(y_k, t_j) = EC(x, t_j)$ según la ecuación (3.4). Aquí se ignora el posible hecho, por facilidad pues es de difícil estimación, que las compras de energía en realidad podrían aumentar frente al año anterior, en tal caso $EC(y_k, t_j) \neq EC(x, t_j)$.

⁴ Para ser más preciso este término en realidad no se refiere a una elasticidad pues la elasticidad entre dos variables se refiere al porcentaje de cambio de una variable respecto al porcentaje de cambio de otra variable. Para este caso, k es el porcentaje de energía recuperada que se hace efectiva en el incremento de las ventas. Aunque su definición no es precisamente de elasticidad, y siendo de uso común entre los operadores de red, se adopta esta terminología haciendo salvedad con la precisión aquí indicada.

$$ER2(y_k, t_j) = (1 - k) ER(y_k, t_j) \quad (3.13b)$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en la ecuación de beneficios y empleando la convención del modelo introducido en la sección 1 (beneficio por incremento por facturación y ahorro por compra) se obtienen, respectivamente, las ecuaciones (3.14) y (3.15).

$$\Delta F_1(y_k, t_j) = D \times ERI(y_k, t_j) = D \times k \times ER(y_k, t_j) \quad (3.14)$$

$$\Delta F_2(y_k, t_j) = (G + T) ER2(y_k, t_j) = (G + T) \times (1 - k) \times ER(y_k, t_j) \quad (3.15)$$

En conclusión, los beneficios económicos de un plan de disminución de pérdidas se manifiestan por incremento en facturación y ahorro en pagos por compra de energía, cada uno con diferentes componentes del CU. Así mismo, la elasticidad es necesaria cuando se tiene estimado el total de la energía recuperada para el siguiente periodo, pero es necesario desagregarla. Es importante resaltar el hecho indicado en la introducción que la elasticidad aparece como consecuencia de un desarrollo matemático, coherente con la experiencia reportada de los C-OR y señalada en los comentarios recibidos al convenio anterior.

3.4. Cálculo de la energía recuperada y energía vendida a partir de las pérdidas estimadas

Note que las ecuaciones de beneficios requieren el cálculo de la energía recuperada en los diferentes estados del sistema. En el modelo del convenio anterior, esta energía se calculaba con base en la diferencia de dos áreas. Este cálculo es preciso revisarlo pues la conceptualización de este modelo (diferente al presentado en el otro convenio) se basa en la figura 3.1, la cual, como se explicó anteriormente, considera explícitamente todos los beneficio (energías $ERI(y_k, t_j)$ y $ER2(y_k, t_j)$) del plan de recuperación.

Para calcular la energía total recuperada, es preciso recordar los pasos del algoritmo para determinar la ruta óptima y de menor costo descritos al final de la sección 2. Al final del paso 2 de esa secuencia (página 13), los niveles de pérdidas en los diferentes estados (nodos) del árbol de decisión son conocidos. Igualmente, es necesario indicar, por lo pronto, que se asume conocidos los valores de la energía comprada y vendida en el estado x durante el año t_i , esto es, $EC(x, t_i)$ y $EV(x, t_i)$ ⁵. En otras palabras, el objetivo es determinar la

⁵ Sobre este supuesto se hará un análisis al final de esta sección.

energía total recuperada para el estado y_k durante el año t_j ($ER(y_k, t_j)$) asumiendo conocido el nivel de pérdidas $\Delta P(y_k, t_j)$ y los valores $EC(x, t_j)$ y $EV(x, t_j)$.

Considere la definición del nivel de pérdidas mostrada en la ecuación (3.16). Observe que de esta ecuación, siguiendo los supuestos del párrafo anterior, solo es conocido el nivel de pérdidas.

$$\Delta P(y_k, t_j) = \frac{EC(y_k, t_j) - EV(y_k, t_j)}{EC(y_k, t_j)} \quad (3.16)$$

Por otro lado, considere nuevamente las ecuaciones (3.3) y (3.4), las cuales relacionan las ventas de energía y las compras de energía entre dos años consecutivos. Si se sustituyen los valores $ER1(y_k, t_j)$ y $ER2(y_k, t_j)$ de estas por los indicados en (3.13a) y (3.13b) se obtiene las ecuaciones (3.17a) y (3.17b).

$$EV(y_k, t_j) = EV(x, t_j) + V(y_k, t_j) + k \times ER(y_k, t_j) \quad (3.17a)$$

$$EC(y_k, t_j) = EC(x, t_j) - (1 - k) \times ER(y_k, t_j) \quad (3.17b)$$

Organizando las ecuaciones (3.16) y (3.17a) y (3.17b) se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones.

$$\begin{aligned} EC(y_k, t_j)(\Delta P(y_k, t_j) - 1) + EV(y_k, t_j) &= 0 \\ EV(y_k, t_j) - k \times ER(y_k, t_j) &= EV(x, t_j) + V(y_k, t_j) \\ EC(y_k, t_j) + (1 - k) \times ER(y_k, t_j) &= EC(x, t_j) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Note que estas ecuaciones corresponden a un *sistema lineal de tres ecuaciones y tres incógnitas* en donde los elementos del lado derecho de las ecuaciones son todos conocidos⁶. Organizando este sistema de forma matricial en el cual el vector $[EC(y_k, t_j) \quad EC(y_k, t_j) \quad ER(y_k, t_j)]^T$ contiene las incógnitas del problema se tiene el sistema indicado a continuación.

⁶ La variable $V(y_k, t_j)$, crecimiento vegetativo de la demanda, se puede expresar como un porcentaje de las ventas de energía del año anterior, esto es, $EV(x, t_j)$.

$$\begin{bmatrix} (\Delta P(y_k, t_j) - 1) & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -k \\ 1 & 0 & (1-k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} EC(y_k, t_j) \\ EV(y_k, t_j) \\ ER(y_k, t_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ EV(x, t_i)(1 + \%V(y_k, t_j)) \\ EC(x, t_i) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Este sistema se resuelve invirtiendo la matriz que pre-multiplica el vector de incógnitas y su resultado multiplicarlo por el vector del lado derecho^{7,8}. Realizando estas operaciones matriciales, el resultado del sistema es:

$$\begin{aligned} EC(y_k, t_j) &= \frac{1}{\Delta P(y_k, t_j)(k-1)+1} \left(-(k-1) \left(EV(x, t_i)(1 + \%V(y_k, t_j)) \right) + kEC(x, t_i) \right) \\ EV(y_k, t_j) &= \frac{(\Delta P(y_k, t_j) - 1)}{\Delta P(y_k, t_j)(k-1)+1} \left((k-1) \left(EV(x, t_i)(1 + \%V(y_k, t_j)) \right) - kEC(x, t_i) \right) \\ ER(y_k, t_j) &= \frac{1}{\Delta P(y_k, t_j)(k-1)+1} \left(- \left(EV(x, t_i)(1 + \%V(y_k, t_j)) \right) - (\Delta P(y_k, t_j) - 1) EC(x, t_i) \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

Note que estas ecuaciones determinan los valores de la energía de compras $EC(y_k, t_j)$, las ventas de energía $EV(y_k, t_j)$ y la energía recuperada $ER(y_k, t_j)$ a partir de los valores del año anterior. Lo cual implica que son necesarios para el cálculo de estas energías. Sin embargo, cuando se estima estos valores los del periodo anterior siempre son conocidos, esto es, los del primer periodo son conocidos pues son datos de entrada en la interfaz del programa, con estos se calculan los del siguiente periodo (ecuaciones (3.20)), y estos a su vez son utilizados para el siguiente periodo. Como se puede apreciar es un proceso de barrido hacia adelante en donde siempre se conocen los del periodo anterior.

⁷ El determinante de la matriz de lado izquierdo está dado por $\Delta P(x, t_i)(1 - k) - 1 \neq 0$. Esto implica que la matriz tiene inversa y el sistema solución única.

⁸ Observe que esta representación hace explícito el crecimiento vegetativo como un porcentaje de las ventas de energía, de hecho, en la interfaz de usuario del programa se ingresa este.

4. Red Neuronal como Estimador de Pérdidas

4.1. Descripción de la red neuronal

La herramienta diseñada para estimar las pérdidas técnicas y no técnicas de un operador de red es una red neuronal. Ignorando su topología interna, sobre la cual se dará detalles más adelante, las entradas y salida de la red neuronal (RN), utilizando la definición de las variables y nomenclatura de la figura 3.1, se muestra en la figura 4.1. Con el fin de clarificar el significado de estas variables, a continuación se repite su definición.

Entradas de la red neuronal

- I_k : Inversiones y gastos los cuales serán destinados al programa de disminución de pérdidas para el siguiente año en \$/kWh.
- $\Delta P(x, t_i)$: Nivel de pérdidas técnicas y no técnicas al final del año en curso.
- I_v : Inversiones y gastos destinados al programa de disminución de pérdidas durante el año en curso en \$/kWh. Este valor es calculado como las inversiones y gastos totales divididos por las ventas de energía.
- $EV(x, t_i)$: Ventas de energía al final del año en curso.
- $\Delta P(w, t_{i-1})$: Nivel de pérdidas técnicas y no técnicas alcanzado al final del año anterior.
- I_w : Inversiones y gastos destinados al programa de disminución de pérdidas durante el año anterior en \$/kWh.
- $EV(w, t_{i-1})$: Ventas de energía durante del año en anterior.

Salida de la red neuronal

- $\Delta P(y_k, t)$: Nivel de pérdidas técnicas y no técnicas estimados para el siguiente año.

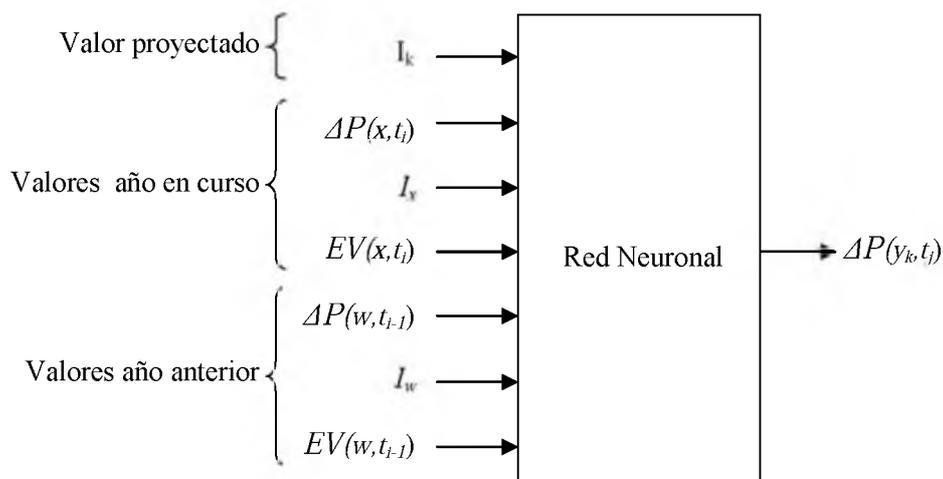


Figura 4.1. Red Neuronal como estimador del nivel de pérdidas

Para hacer las variables indicadas en la figura 4.1 coherente con el modelo descrito en la figura 2.1, aquí se asume que el sistema del operador de red se encuentra, el año en curso (denotado como año t_i) en el estado x . En año anterior (año t_{i-1}) el sistema se encontraba en un estado denotado como w , de aquí la notación en paréntesis (w, t_{i-1}) referidas a las variables del año anterior. Por último, es preciso aclarar que si durante el año en curso no se tiene los valores de las variables $\Delta P(x, t_i)$ y $EV(x, t_i)$ es preciso estimarla. Por otro lado la salida de la RN, tal como se muestra en la figura 4.1, corresponde al nivel de pérdidas estimado para el siguiente año ($\Delta P(y_k, t_i)$) basado en las inversiones y gastos proyectados (I_k) y los datos del año en curso y el año anterior. Note que esta arquitectura es diferente a la del convenio anterior pues se elimina las ventas de energías proyectadas para el siguiente periodo como valor de entrada. Esta variable se elimina pues de es difícil estimar las ventas si no se tiene las pérdidas estimadas por la RN, de tal forma, que esto generaba un problema de estimación que se corrigió al eliminar esta variable.

4.2. Resultado del entrenamiento

La información para entrenar la red neuronal fue proporcionada por la CREG. Los operadores de red seleccionados con su respectiva serie de tiempo son los mostrados en la tabla 1. Los datos entregados contienen, para cada año de la serie, la energía de entrada, energía de salida, el nivel de pérdidas y las inversiones y gasto totales. La inversión en \$/kWh es obtenido dividiendo las inversiones y gastos totales sobre la energía de salida. Por comentarios recibidos por los operadores de red, las energías excluyen la energía en tránsito por el sistema del operador de red.

Tabla 1. Información de entrenamiento para la RN

Operador de Red	Serie de tiempo
ELECTRICARIBE	2002-2008
CEDENAR	2002-2008
CENS	2002-2008
CHEC	2003-2008
CODENSA	1999-2008
EDEQ	2003-2008
EEPPM	1998-2006
ELECTROHUILA	2003-2008
EMSA	2004-2008
ENERTOLIMA	2004-2008
EPSA	1998-2008

La red diseñada y entrenada tiene topología 7-18-1, esto es, siete entradas (mostrada en la figura 4.1), 18 neuronas en la capa oculta y 1 salida (mostrada en la figura 4.1). El diseño y entrenamiento es realizado empleando los comandos del toolbox Neural Network de Matlab®. La función de transferencia en la capa oculta es la tangente hiperbólica⁹, en la capa de salida la función lineal¹⁰ y el entrenamiento es realizado con el algoritmo de Regulación Bayesiana de Propagación hacia atrás (Bayesian regulation backpropagation)¹¹.

Para el entrenamiento de la red neuronal es necesario normalizar las entradas y salida de la red, para esto, se utilizó el comando `mapstd` cuyos parámetros de normalización son los siguientes:

```
>> ps
ps =

    name: 'mapstd'
   xrows: 7
   yrows: 7
  xmean: [7x1 double]
   xstd: [7x1 double]
  ymean: 0
   ystd: 1

>> ts
ts =

    name: 'mapstd'
   xrows: 1
   yrows: 1
  xmean: 0.1681
   xstd: 0.0759
  ymean: 0
   ystd: 1

>> ps.xmean' %Transpuesto para facilitar su representacion
ans =

    1.0e+009 *
    0.0000    0.0000    0.0000    3.3642    0.0000    0.0000    3.2560
```

⁹ Esta función esta descrita tecleando “help tansig” en la ventana de comandos de Matlab®

¹⁰ Esta función esta descrita tecleando “help purelin” en la ventana de comandos de Matlab®

¹¹ El comando de entrenamiento es “trainbr”. Mayor información tecleando “help trainbr” en la ventana de comandos de Matlab®

La matriz y vectores de la red neuronal una vez entrenada son los siguientes.

```
>> net.IW{1,1} %Matriz con los pesos de la capa de entrada
```

```
ans =
```

```
    0.0653    -0.1437    -0.0318    -0.0505     0.0247     0.0098     0.0641  
    0.0256    -0.1909    -0.0820     0.0584     0.0467     0.2679     0.2324  
   -0.0050     0.0173     0.0060     0.0050     0.0015     0.0039    -0.0079  
   -0.0629     0.1419     0.0325     0.0478    -0.0247    -0.0087    -0.0617  
    0.0301    -0.0860    -0.0256    -0.0242     0.0061    -0.0069     0.0358  
   -0.0585     0.1340     0.0314     0.0468    -0.0208    -0.0041    -0.0574  
   -0.0701     0.1507     0.0321     0.0521    -0.0279    -0.0158    -0.0700  
    0.0516    -0.1241    -0.0309    -0.0417     0.0173     0.0002     0.0517  
    0.0458    -0.1156    -0.0305    -0.0363     0.0148    -0.0019     0.0476  
   -0.0434     0.3431     0.3131     0.2651    -0.1681     0.1902     0.0730  
   -0.1136     0.7752    -0.4366     0.3738     0.3154    -0.0347    -0.3559  
    0.0768    -0.1632    -0.0340    -0.0504     0.0347     0.0298     0.0811  
   -0.0817     0.1747     0.0366     0.0427    -0.0403    -0.0608    -0.1047  
    0.0135    -0.0453    -0.0153    -0.0103     0.0004    -0.0062     0.0198  
   -0.2623    -0.5315    -0.1238    -0.0920     0.3481    -0.1779     0.1617  
    0.0078    -0.0274    -0.0096    -0.0059    -0.0004    -0.0043     0.0122  
   -0.0319     0.0897     0.0264     0.0257    -0.0070     0.0066    -0.0372  
   -0.0762     0.1624     0.0340     0.0505    -0.0343    -0.0285    -0.0799
```

```
>> net.LW{2,1}' %Vector con los pesos de la capa de salida
```

```
ans =
```

```
   -0.1972  
   -0.3437  
    0.0261  
    0.1840  
   -0.1030  
    0.1788  
    0.2101  
   -0.1589  
   -0.1406  
    0.4829  
    0.7844  
   -0.2202  
    0.2514  
   -0.0531  
   -0.5537  
   -0.0326  
    0.1077  
    0.2178
```

```
>> net.b{1} %% Vector de "bias" de la capa oculta
```

```
ans =
```

```
-0.0386
-0.1768
 0.0032
 0.0365
-0.0169
 0.0334
 0.0431
-0.0289
-0.0254
 0.0473
-0.1718
-0.0514
 0.0700
-0.0079
 0.5082
-0.0047
 0.0179
 0.0505

>> net.b{2} %% Vector de "bias" de la neurona de salida

ans =

    0.2103
```

Con los valores mostrados correspondientes a los pesos de la red de las diferentes capas y los valores de normalización, es posible replicar el comportamiento de la red neuronal empleando Matlab®. Con esto se da respuesta a los comentarios en los cuales se preguntaba por los detalles internos de la red.

4.3. Pruebas de entrenamiento y generalización

En esta sección se muestran las pruebas realizadas a la red neuronal con el fin de evaluar el entrenamiento y capacidad de generalización. Para esto, se diseñaron tres pruebas, a saber:

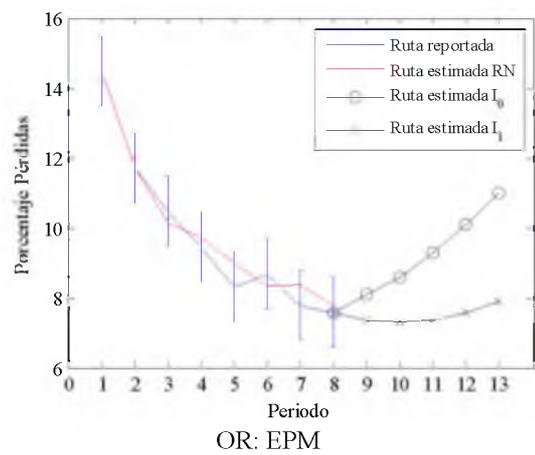
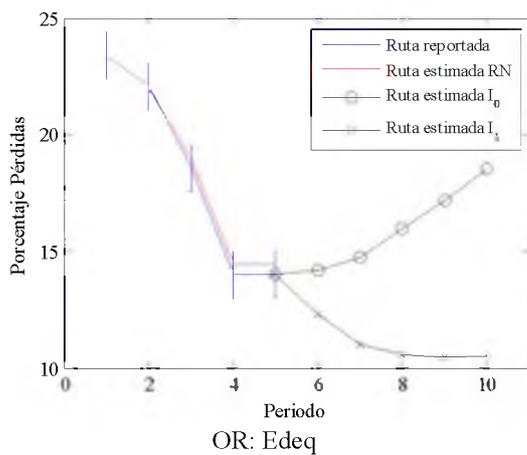
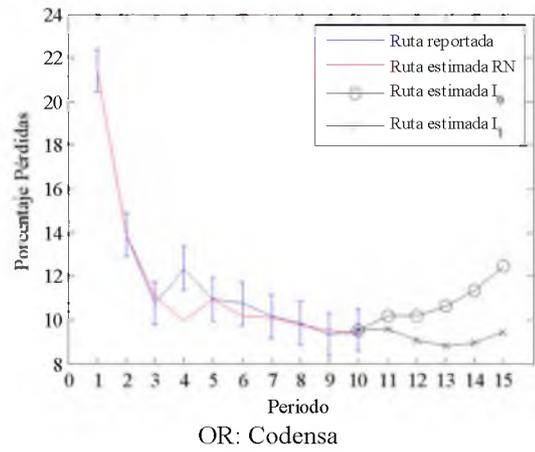
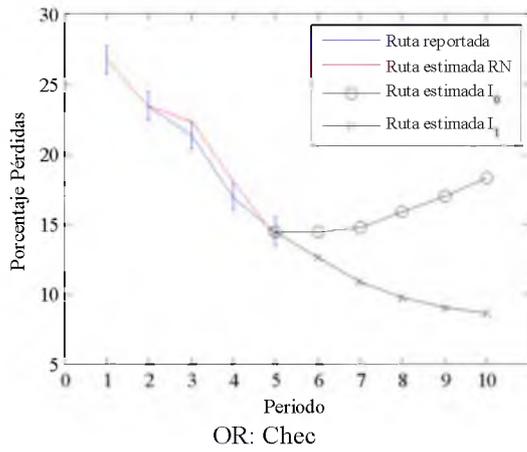
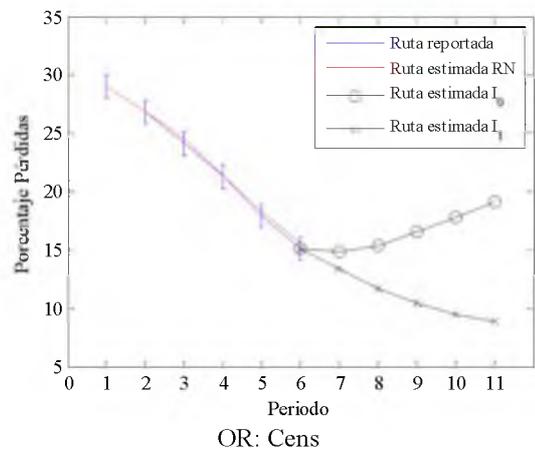
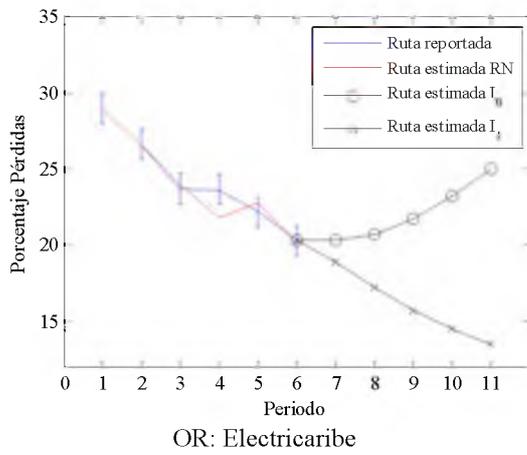
1. La primera prueba consiste en evaluar el comportamiento de la red respecto a la serie de datos histórica con la cual fue entrenada. La motivación de esta prueba es determinar si la red está en capacidad de reproducir el comportamiento histórico de los operadores de red, esto es, determinar si efectivamente la red aprendió las prácticas de disminución de pérdidas reflejas por los operadores de red a través de sus datos.
2. La segunda prueba consiste en evaluar la capacidad de generalización de la red para un caso extremo en donde no se realicen inversiones en disminución de pérdidas. La motivación de esta prueba es evaluar la respuesta para valores bajos de inversiones, de hecho, para un valor nulo de inversiones es de esperarse que la red responda con un incremento en el valor de las pérdidas.

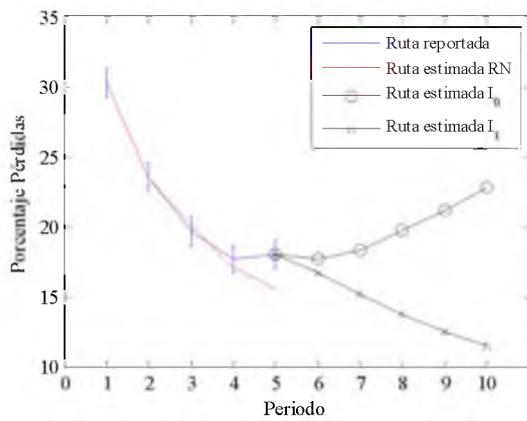
3. La tercera prueba consiste en evaluar la capacidad de generalización para valores de inversiones con los cuales pueda sostener o disminuir las pérdidas. La motivación de esta prueba es determinar si efectivamente la red aprende la tendencia de disminución explícita en el conjunto de entrenamiento.

Los resultados de estas pruebas se indican en las figuras abajo mostradas, en donde cada figura reporta un OR empleado en el aprendizaje. Cada figura está compuesta de dos partes. La primera parte consiste en la prueba 1 y compara la ruta reportada por el OR (línea azul) con la estimada por la red neuronal (línea roja). Las pequeñas líneas verticales muestran el rango de tolerancia aceptable para la estimación de la RN, esto es, se considera que la RN aprendió el comportamiento histórico del OR si la estimación está dentro del rango de tolerancia. Este rango se establece como ± 1 punto porcentual del valor reportado por el OR. Con contadas excepciones *todas* las rutas estimadas por la RN se encuentran dentro del rango de tolerancia. Estas excepciones se aceptan pues de lo contrario se sobreentrena la RN y con ello se pierde capacidad de generalización.

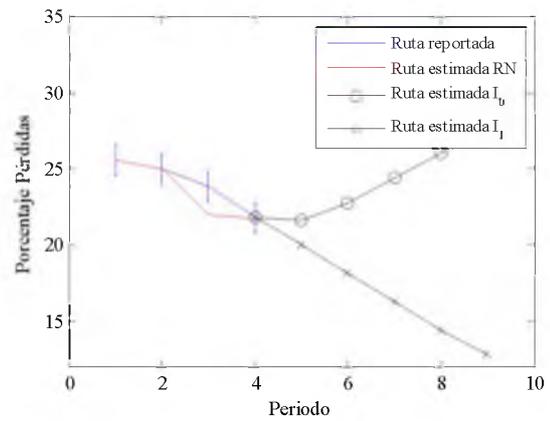
Las pruebas 2 y 3 igualmente se muestran en cada figura. Para este caso, el final de la serie de tiempo reportada para cada OR se continúa con dos escenarios. El primer escenario (prueba 2) consiste en evaluar el comportamiento para los siguientes cinco años en caso que no se realiza inversión alguna. Esta senda se muestra con la línea de color negro y marcada con círculos y denominada como Ruta estimada I_0 , en donde, para cada prueba $I_0=0$. Como se puede observar, para *todos* los OR, las RN aumenta las pérdidas del sistema. Este comportamiento demuestra que efectivamente se logró un buen entrenamiento pues en la base de datos disponible no se tenía dato alguno que mostrara el comportamiento de las pérdidas ante la ausencia de inversiones, es decir, no existía evidencia numérica de este comportamiento, aun así, se logró capturar esta situación que es evidente de acuerdo a la experiencia manifiesta de los OR.

La siguiente prueba de generalización (prueba 3), similar que la prueba 2, consisten en continuar la serie de tiempo con un valor, dentro de los datos históricos de inversión de cada OR, con el cual pueda disminuir el valor de sus pérdidas. Esta senda se muestra con la línea de color negro y marcado con equis y denominada como Ruta estimada I_i , en donde, I_i es un valor histórico de cada OR. Como se puede observar, para *todos* los OR, las RN muestra que efectivamente existe un valor de inversión con el cual puede seguir disminuyendo o sosteniendo las pérdidas.

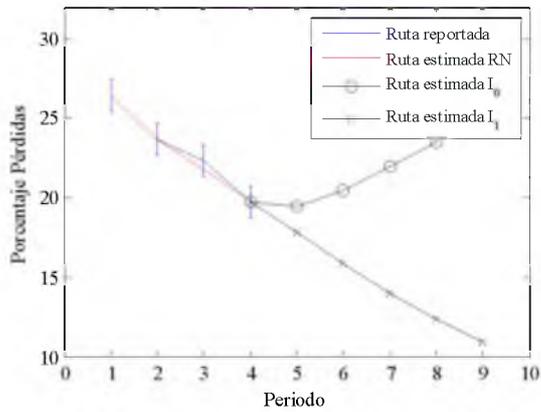




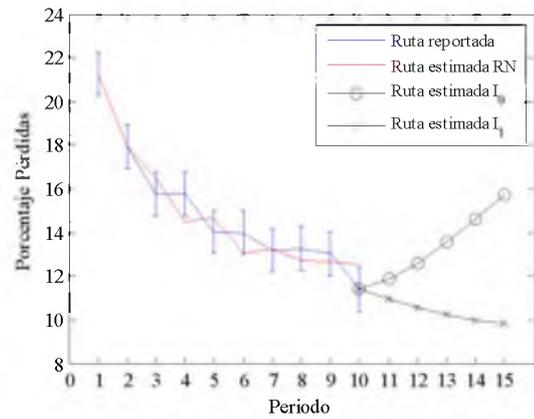
OR: Electrohuila



OR: Emsa



OR: Enertolima



OR: Epsa

Finalmente, como se puede evidenciar en las distintas graficas, el comportamiento de la RN es exitoso pues logra aprender el comportamiento histórico de los OR con una buena capacidad de generalización. Esta generalización, principal característica de la RN, subsana las dificultades que se manifestaron con la RN del anterior convenio la cual presentaba problemas de estimación para niveles de inversión bajos.

5. Descripción del Programa Computacional

Esta sección describe algunos aspectos técnicos del programa computacional desarrollado por el grupo de investigación del Planeamiento de Sistemas Eléctricos y el grupo de investigación Siruis de la Universidad Tecnológica de Pereira¹². En esta sección no se describe el uso del programa, para ello por favor consulte el manual del usuario. El programa se desarrolla bajo un ambiente cliente-servidor y se accede a través de la siguiente página de la CREG. El programa corre bajo un esquema cliente-servidor, el servidor es un super computador Silicon Graphics SGI RASC Altix-350 ubicado en el centro de alto desempeño computacional de la Universidad Tecnológica de Pereira. Los derechos comerciales del programa pertenecen a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

5.1. Restricciones al árbol de decisión implementadas en el software

Dos tipos de restricciones sobre el árbol de decisión están implementadas atendiendo

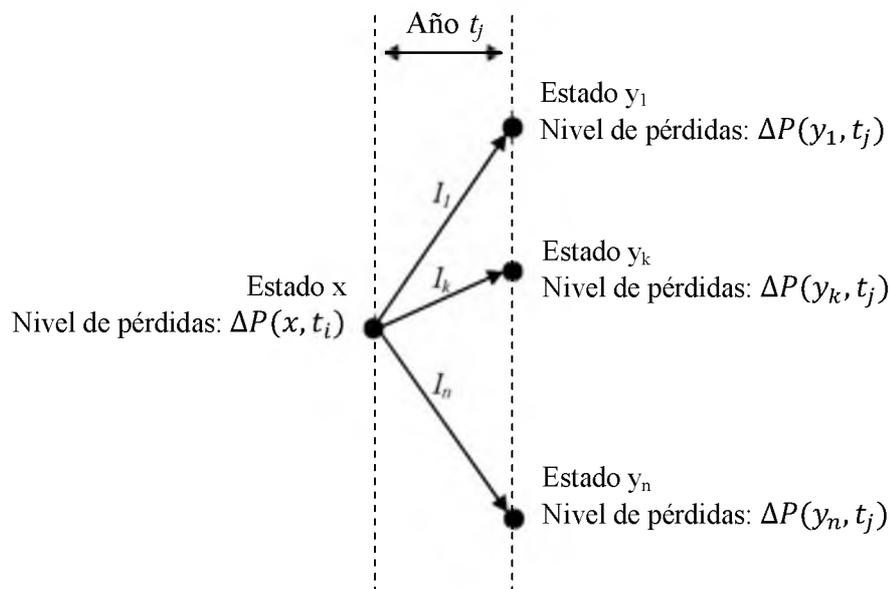


Figura 5.1. Valores de pérdidas que caracterizan a los diferentes estados (nodos) en el árbol de decisión

¹² Las personas que intervinieron en la elaboración del programa computacional son: Harold Salazar Isaza (Creación del modelo teórico, entrenamiento de la red neuronal y análisis de resultados), Camilo A. Gallego (Programación del prototipo del modelo teórico, pruebas al programa computacional y análisis de resultados), José Alfredo Jaramillo Villegas (Vectorización y paralelización del algoritmo computacional), John Haiber Osorio Ríos (Programador), René Gómez Londoño (Programador) y Gilberto Vargas Cano (Pruebas de software).

comentarios de los operadores de red y de la CREG. Para comprender estas restricciones, considere la figura 5.1 la cual es similar a la figura 1 pero simplificada. En este árbol los nodos están caracterizados por el nivel de pérdidas, esto niveles conservan la convención del modelo introducido en la sección 2. Dos tipos de restricciones, denominadas tipo 1 y tipo 2 son realizadas al árbol de decisión, la descripción de estas restricciones son las siguientes:

Restricción tipo 1: Esta simplificación consiste en eliminar los nodos cuyo nivel de pérdidas sea inferior a las pérdidas técnicas. Un **nodo es factible** (no se elimina del árbol) si $\Delta P(y_k, t_j) \geq \text{Criterio1}$, en donde el *Criterio1* es el valor de las pérdidas técnicas. El valor de la variable *Criterio1* es un dato establecido por la CREG para cada operador de red. Este dato lo ingresa la CREG a través de la cuenta de administración del sitio creada para tal propósito.

Restricción tipo 2: Esta simplificación consiste en eliminar nodos cuyo nivel de pérdidas no sean alcanzables durante la implementación del programa de recuperación de pérdidas. Esta restricción se implementa por sugerencia de la CREG y se encuentra en la resolución en consulta 184 del 2010. Para esta restricción, se define el siguiente criterio:

$$\text{Criterio}_2 = \left| \Delta P(0, t_0) - \Delta P(\text{deseado}, t_f) \right| \times \text{Factor}$$

En donde:

- $\Delta P(0, t_0)$: Nivel de pérdidas del C-OR antes de iniciar el plan, esto es, en el año t_0 . Este dato es ingresado por el usuario a través de la interfaz de usuario.
- $\Delta P(\text{deseado}, t_f)$: Nivel de pérdidas proyectado por el C-OR al finalizar el plan de disminución de pérdidas en el año t_f . Este dato se ingresa a través de la interfaz de usuario.
- Factor* : Dato definido por la CREG e ingresado por la comisión a través su cuenta de administración del sitio. En la actualidad 0.4.

Con lo anterior, un **nodo es factible** si $|\Delta P(x, t_i) - \Delta P(y_k, t_j)| \leq \text{Criterio2}$, para todos los nodos x que tenga conexión con y_k en el árbol de decisión entre dos periodos consecutivos tal como lo indica la figura 5.1.

5.2. Soporte técnico del programa computacional

Descripción de los componentes que hacen parte del soporte técnico

El programa computacional “Plan de Reducción de Pérdidas de Energía”, desarrollado por el Grupo de Investigación de Planeamiento de Sistemas Eléctrico y el Grupo de Investigación Sirius de la Universidad Tecnológica de Pereira está conformado por tres componentes. El primer componente es el modelo matemático que permite determinar la senda de reducción de pérdidas óptima al igual y la ruta de menor costo, el segundo componente es la programación de estos modelos en software al igual que la programación de una interface gráfica basada en web para ejecutar el modelo, por último, el tercero componente es la plataforma de hardware requerida para la ejecución del software y de la interface gráfica. Se definen a continuación el soporte técnico que brindará la Universidad Tecnológica de Pereira a través de los grupos de investigación vinculados en este convenio y que se relacionan con las componentes dos y tres, esto es, de software y hardware. La componente uno se excluye del soporte técnico pues sobre el modelo existe un consenso alcanzado con los miembros de la comisión.

Soporte técnico componente de software

La componente de software se refiere a la implementación del modelo en un lenguaje de programación así como la programación de una interface grafica web. La implementación del modelo es transparente para el usuario pues ella se accede a través de un conjunto de páginas web que permiten la realización de las simulaciones y la visualización de los resultados. De común acuerdo, se establece un periodo de 2 meses a partir del 6 de Febrero para recibir comentarios por parte de la comisión sobre la interfaz o solicitar revisión en la programación del modelo. El tiempo de respuesta será de común acuerdo con los miembros de la comisión.

Soporte técnico componente de hardware

La componente de hardware se refiere a los equipos de cómputo y canal de internet necesario para acceder y ejecutar la aplicación residente en los servidores de la universidad. La Universidad Tecnológica de Pereira garantizan las condiciones necesarias a través de su centro de datos para el correcto funcionamiento de los servidores web y del computador de alto desempeño Silicon Graphics SGI RASC Altix-350. En caso de presentarse algún

inconveniente relacionado con el hardware, la Universidad Tecnológica de Pereira a través del Grupo de Investigación Sirius se compromete a solucionar el problema en un tiempo no mayor a tres (3) días; excepto en casos de fuerza mayor en donde la solución del fallo dependa de terceros. Los casos de fallas de hardware siempre serán notificados a la CREG así como un plan de contingencia en caso de requerirse. El Grupo de Investigación Sirius brindará este soporte a la CREG durante un término de 18 meses a partir del 6 de Febrero de 2011.

Procedimiento para atender cualquier solicitud de soporte

Con el fin de atender cualquier solicitud de soporte técnico por parte de la CREG o los usuarios de esta aplicación (operadores de red), se define el siguiente procedimiento para atender las solicitudes.

1. La CREG destinara una persona dedicada a recibir las solicitudes de soporte técnico y preguntas del uso del programa por parte de los usuarios del sistema. Se recomienda crear una cuenta para este fin (por ejemplo: sopORTEPLANPERDIDAS@CREG.gov.co). Es importante recordar que la creación o modificación de usuarios, claves, asignación de nivel de pérdidas y demás atributos de los operadores de red, deberán ser atendidos por esa persona pues la cuenta CREG está desarrollada para ese propósito. La Universidad Tecnológica de Pereira no es responsable de solicitudes que puedan ser atendidas directamente por la cuenta del usuario CREG.
2. En caso que la solicitud esté relacionada con las componentes 2 y 3 descritas en la sección 5.2.1, la comisión enviara un correo electrónico a la cuenta sopORTECREG@sIRIUS.utp.edu.co. La solicitud será atendida en un tiempo de común acuerdo con los miembros de la comisión.

Es importante recordar que la Universidad Tecnológica de Pereira no atiende consultas de soporte técnico directamente, toda consulta debe ser dirigida a la comisión quien, si es el caso, la hará llegar a la Universidad.