

Determinación de Metas de Pérdidas Técnicas utilizando Análisis Envolverte de Datos y Análisis Técnico-Económico

A. Meffe, F. Romero, A. U. Antunes, A. A. Alves, *Daimon, São Paulo, Brazil*
 S. C. P. Habib, A. F. Rocha, *CEMIG, Belo Horizonte, Brazil*
 D. A. Nunes, *Axxiom, Belo Horizonte, Brazil*

Abstract--Reducing the technical losses is one of the great challenges for the Brazilian power utilities. The Brazilian regulator has adopted a simplified method to calculate losses, wherein there are some assumptions that lead to lower losses. Its main goal is giving the same treatment to all distribution companies in the tariff review process, in which the technical losses are one of the inputs. However, one has to consider that each system has its own characteristics and achieving lower losses may not be feasible. Thus, it is quite important to know the level of technical losses that would represent the maximum efficiency for a distribution system considering its characteristics. This work is intended to achieve that goal by means of two different approaches: using efficiency and productivity analysis and technical-economic analysis. The techniques are presented and the obtained results are shown and discussed.

Index Terms--data envelopment analysis, loss reduction guideline, multivariate analysis. technical losses, technical losses' targets.

I. INTRODUCCIÓN

ACTUALMENTE, las pérdidas técnicas de energía tienen gran relevancia en el sector eléctrico brasileño. Por un lado, las distribuidoras buscan calcular las pérdidas de forma cada vez más precisa y próxima de la realidad, pues las pérdidas constituyen uno de los principales insumos para el cálculo de las tarifas de energía. Por otro lado, el regulador ha buscado tratar de igual forma a todas las distribuidoras en el cálculo de pérdidas técnicas reguladas, utilizando metodología propia y sencilla y adoptando premisas de cálculo que

conducen a una red optimizada, buscando evitar que una eventual mala gestión por parte de las distribuidoras sea transferida a los consumidores.

De forma paralela, ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica –, el regulador brasileño, está buscando establecer metas de pérdidas técnicas y, además, una trayectoria para su reducción a ser cumplida por las distribuidoras. Con ese panorama, es evidente la importancia de la definición de metas, la cual debe ser hecha de la forma más justa posible.

El objetivo de este trabajo era desarrollar un conjunto de metodologías para buscar la definición de metas de pérdidas técnicas, además de la respectiva trayectoria de reducción a ser cumplida en determinado periodo de estudio. Para ello, se han estudiado y se han desarrollado dos métodos. El primer método busca establecer metas de pérdidas técnicas con base en la eficiencia relativa de una distribuidora a partir de comparaciones con las demás distribuidoras (metas referenciales). Para eso, se utilizó el Análisis Envolverte de Datos (DEA). El segundo método utiliza Análisis Técnico-Económico de algunas obras cuyo objetivo es reducir las pérdidas técnicas. Con la realización de las obras ventajosas en términos financieros, se obtienen las metas absolutas de pérdidas. Sea cual sea el método elegido, el objetivo es obtener una meta o un valor óptimo para las pérdidas técnicas. Con esa meta es posible establecer una trayectoria de reducción de pérdidas a lo largo de un horizonte plurianual.

Con la utilización del DEA es posible obtener la eficiencia de cada distribuidora del conjunto de datos analizado. Por ese método es posible establecer un *ranking* de las mejores distribuidoras y la empresa más eficiente presentará una eficiencia de 100%. Entre tanto, eso no garantiza que la empresa sea realmente eficiente. El método apenas garantiza que la empresa líder es la más eficiente de todas.

Con la utilización del análisis técnico-económico, se puede estudiar algunas obras cuyo objetivo es reducir las pérdidas técnicas y determinar su relación beneficio/costo. Mientras esa relación sea ventajosa, la ejecución de la obra es viable y el valor óptimo de las pérdidas todavía no fue alcanzado.

Este trabajo presentará los dos métodos desarrollados y los resultados obtenidos con la aplicación de cada uno de ellos.

Se destaca que este trabajo es resultado de un proyecto de investigación y desarrollo que involucró a CEMIG D, la

This work was supported by CEMIG D – Companhia Energética de Minas Gerais – a distribution company from Minas Gerais State, Brazil.

A. Meffe is with Daimon Engenharia e Sistemas, São Paulo, Brazil (e-mail: andre.meffe@daimon.com.br).

F. Romero is with Daimon Engenharia e Sistemas, São Paulo, Brazil (e-mail: fabio.romero@daimon.com.br).

A. U. Antunes is with Daimon Engenharia e Sistemas, São Paulo, Brazil (e-mail: alden@daimon.com.br).

A. A. Alves is with Daimon Engenharia e Sistemas, São Paulo, Brazil (e-mail: alessandro@daimon.com.br).

S. C. P. Habib is with CEMIG, Belo Horizonte, Brazil (e-mail: saad@cemig.com.br).

A. F. Rocha is with CEMIG, Belo Horizonte, Brazil (e-mail: afrocha@cemig.com.br).

D. A. Nunes is with Axxiom, Belo Horizonte, Brazil (e-mail: dario.nunes@axxiom.com.br).

empresa de distribución del Estado de Minas Gerais, en Brasil, y que suministra energía eléctrica a más de 7,5 millones de clientes. Las empresas ejecutoras del proyecto fueron Daimon Engenharia e Sistemas y Axxiom Soluções Tecnológicas.

II. METAS REFERENCIALES

La obtención de metas referenciales comprende la realización de comparaciones entre varias empresas. Para ello, este trabajo utilizó un conjunto de datos de 33 empresas brasileñas y está dividido en dos partes. En la primera parte fueron definidos los atributos descriptivos de las empresas cuyo objetivo era caracterizar cada distribuidora en cuanto a las pérdidas técnicas. Los atributos seleccionados deben representar las variables explicativas de las pérdidas. Para determinar los atributos descriptivos primero se preparó un listado inicial de atributos que pudieran explicar el valor observado de pérdidas, tales como longitud de red, resistencia promedio, mercado global de energía, etc. Utilizando una técnica de análisis multivariada [3], [5], el Análisis Factorial, el listado inicial de atributos fue reducido a un conjunto más pequeño, eliminando variables de entrada correlacionadas entre sí y variables de entrada no correlacionadas con la variable observada (pérdidas). Aun así, el conjunto final de atributos era grande y se hizo necesario realizar una nueva reducción en el número de variables seleccionadas utilizando el conocimiento técnico de profesionales expertos en el tema.

En la segunda parte el Análisis Envoltante de Datos (DEA) fue aplicado al conjunto de datos de forma a obtener metas individuales de pérdidas basadas en las eficiencias calculadas por el método. Se destaca que las eficiencias obtenidas de esa forma son eficiencias relativas de cada empresa con respecto a las otras empresas del conjunto de datos y, por lo tanto, las metas obtenidas de esa forma son referenciales. La inclusión o exclusión de empresas en ese conjunto seguramente producirá otros valores de eficiencias cuando se realice el análisis nuevamente.

A seguir cada una de las dos etapas mencionadas anteriormente son detalladas.

A. Selección de Atributos

Inicialmente, fueron listados 22 atributos explicativos divididos en 5 grupos: Mercado, Mercado Técnico, Técnico, Técnico Topológico y Topológico.

En el grupo Mercado fueron clasificados 7 atributos: carga máxima [MW] (DemMax), densidad de energía [MWh/km²] (DensEn), cantidad de consumidores de baja tensión por transformador (NUC/NT), mercado global de energía [MWh] (MerGlob), porcentaje del mercado global destinado al consumo en baja tensión [%] (MercGlobBT), cantidad de consumidores de baja tensión (NUC) y densidad de carga [MW/km²] (DensCa).

En el grupo Mercado Técnico fueron clasificados apenas 2 atributos: factor de utilización promedio de los transformadores de distribución [%] (FU) y factor de carga promedio ponderado por el consumo de cada nivel de tensión [%] (FC).

En el grupo Técnico fueron clasificados 4 atributos: potencia instalada de subestaciones de distribución [MVA] (PotInst), pérdidas no técnicas [%] (PerNtec) y los valores promedio de las corrientes máximas de los alimentadores en [A] (Imed) y en [%] (Imed%).

En el grupo Técnico Topológico fueron seleccionados los valores promedio de las resistencias de las redes de media tensión (ResMT) y baja tensión (ResBT) en [Ω] (considera la longitud de las líneas) y en [Ω /km].

Finalmente, los atributos cantidad de transformadores de distribución (NTrafo), longitud total de red [km] (CompTot), valor promedio de la longitud de red MT [km] (CompMT), valor promedio de la longitud de red BT [km] (CompBT) y longitud por unidad de área de concesión [km/km²] (CompTot/AC) fueron seleccionados para el grupo Topológico.

Después de definir los atributos que pueden explicar las pérdidas, se realizó una reducción de los datos con el objetivo de identificar cuales atributos tienen más influencia en las pérdidas técnicas. De modo general, el procedimiento de reducción de los datos empezó con la realización del análisis factorial en cada uno de los 5 grupos y las posibles correlaciones entre variables del mismo grupo fueron evaluadas y se determinó, cuando posible, la reducción o el agrupamiento de variables. En seguida los atributos seleccionados en cada grupo fueron sometidos a un análisis factorial global con el objetivo de identificar las posibles interrelaciones existentes entre ellos. Finalmente, se obtuvo un conjunto de atributos con características distintas y que estadísticamente tienen influencia en las pérdidas técnicas.

Con la realización del análisis factorial en cada grupo y del análisis factorial global, 14 atributos fueron seleccionados para representar las características de red en cuanto a las pérdidas técnicas. La Tabla I contiene las correlaciones de esos atributos con la variable observada: las pérdidas.

TABLA I
CORRELACIÓN ENTRE LOS ATRIBUTOS SELECCIONADOS Y LAS PÉRDIDAS TÉCNICAS

Atributo	Correlación con Pérdida
DensEn	-0,37
MercGlobBT	0,49
FU	-0,50
Imed%	-0,42
PerNtec	0,40
ResMT_esp	0,16
ResBT_esp	0,34
NUC/NT	-0,26
MercGlob	-0,23
FC	0,08
CompTot	0,24
CompMT	0,68
CompBT	0,14
CompTot/AC	-0,62

Después de un análisis técnico de los resultados de la Tabla I fueron seleccionados 6 atributos como atributos de referencia

para el proceso de definición de metas de pérdidas para las distribuidoras: DensEn, MercGlobBT, PerNec, ResMT_esp, ResBT_esp y CompTot/AC. Los atributos relacionados a las resistencias de las redes MT y BT en Ω/km – respectivamente ResMT_esp y ResBT_esp – fueron agregados en una única variable (ResMTBT_esp) obtenida a partir del valor promedio ponderado por los valores promedio de las longitudes de redes MT y BT. Los otros atributos no fueron seleccionados porque tienen baja correlación con la pérdida técnica (por ejemplo, el atributo FC) o porque no tienen un comportamiento definido, como es el caso de MercGlob, FU e Imed% que, de acuerdo con los resultados de la Tabla I, no están positivamente correlacionados con el crecimiento de la pérdida técnica. Es sabido que el crecimiento del mercado global de energía en MWh, por ejemplo, conduce a una elevación de la pérdida técnica total en MWh, pero no se puede concluir lo mismo con respecto a la pérdida técnica total en %, que puede aumentar, disminuir o hasta permanecer inalterada. Eso depende de cómo crecen los valores de la pérdida y del mercado en MWh, siendo este último valor la base de cálculo para la pérdida en %. Lo mismo ocurre con las variables FU e Imed%.

Los valores promedio de las longitudes de las redes MT y BT (CompMT y CompBT), pese a que presentaron buenos resultados, no fueron seleccionados porque la influencia de la longitud de red en las pérdidas técnicas está representada por el atributo CompTot/AC.

Es importante destacar que fueron observadas correlaciones bajas entre la mayor parte de esos atributos y las pérdidas técnicas. Entre tanto, uno debe notar que las pérdidas técnicas totales son compuestas de varias porciones relativas a las pérdidas de cada segmento de red, cada cual teniendo un grado de relación diferenciado con cada atributo de la Tabla I. Considerando que la última etapa del trabajo (definición de metas) la cantidad de variables es un factor restrictivo, se optó por una reducción todavía más grande en el número de atributos inicialmente seleccionados por el análisis factorial.

B. Definición de Metas

Después de determinar los atributos explicativos de las pérdidas técnicas se utiliza una técnica de análisis de eficiencia y productividad para determinar la eficiencia de cada distribuidora en cuanto al valor de pérdida técnica. En este trabajo se utilizó DEA (*Data Envelopment Analysis*), que significa Análisis Envoltente de Datos.

DEA es una técnica para monitorización de eficiencia y productividad de unidades de decisión (empresas), que suministra datos cuantitativos sobre posibles direcciones para la mejora de esas unidades cuando ineficientes. La técnica está basada en el concepto de que, en un proceso productivo, un conjunto de insumos genera un conjunto de productos mediante tecnología existente. Hay varias formas de realizar esa transformación, pero la tecnología existente es un factor limitante. La Figura 1 destaca un área gris en el gráfico, que es definida como el Conjunto de Posibilidad de Producción (CPP). El CPP contiene las varias formas de transformación de insumos en productos, siendo limitado por una función de

frontera que es determinada por la tecnología existente [4], [7].

Analizando la Figura 1, se nota que la empresa A, ubicada en el interior del CPP, podría producir una cantidad de productos igual que la empresa B sin alterar la cantidad de insumos (orientación al producto). Alternativamente, la empresa A podría generar la misma cantidad de productos que la empresa C genera, pero con una cantidad más pequeña de insumos (orientación al insumo). De esa forma, se dice que la empresa A no es eficiente cuando comparada a las empresas B y C. Ya las empresas B y C, ubicadas en la frontera del CPP, son dichas eficientes.

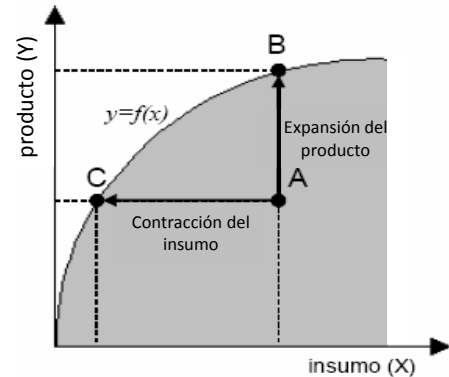


Fig. 1. Conjunto de Posibilidad de Producción (CPP) (extraído de [4]).

DEA utiliza técnicas de programación lineal para calcular un índice de eficiencia que compara el desempeño actual de una empresa con la combinación más eficiente de las otras observaciones insumos/productos. El índice asume el valor 1,0 para las unidades cuya productividad es “mejor” y un valor inferior a 1,0 para las unidades dichas ineficientes, las cuales están ubicadas bajo la frontera. El método define unidades de referencia para cada observación, lo que permite calcular aumento de productos o disminución de insumos para que el “proceso productivo” sea optimizado.

En este trabajo, el valor de pérdidas técnicas corresponde a la variable producto y las variables de insumo son representadas por los 5 atributos descriptivos de la red definidos en la primera etapa.

Para que la aplicación del DEA sea posible el conjunto de datos analizados debe ser tal que un incremento en los insumos conduzca a un incremento en los productos [2]. Caso esa característica no esté presente, uno debe proceder a transformaciones en las variables utilizadas. La variable producto es la pérdida técnica, la cual representa un producto indeseable. Como el DEA objetiva minimizar los insumos o maximizar los productos, es necesario realizar una transformación de la variable pérdida. La transformación utilizada en este trabajo fue el inverso de la pérdida. De esa forma, cuanto más pequeña la pérdida, más grande será su inverso, o sea, más grande el producto. El mismo tipo de transformación fue realizado para las variables de insumo cuando un incremento en sus cantidades conducía a la

disminución de los productos.

Además, uno debe elegir el modelo y la orientación que serán utilizados. Entre los modelos posibles están el CRS (*Constant Returns to Scale*) y el VRS (*Variable Returns to Scale*), los cuales consideran diferentes economías de escala, constante y variable, respectivamente. En cuanto a la orientación, uno debe elegir entre orientación al producto u orientación al insumo. En este trabajo se adoptó el modelo VRS con orientación al producto.

Con la utilización del DEA es posible establecer las trayectorias de reducción de pérdidas para cada empresa. Después de definir la meta, la cual es calculada en función de la eficiencia obtenida para cada empresa, se asume que tal valor debe ser alcanzado a lo largo de un ciclo de revisión tarifaria, o sea, generalmente 4 años en Brasil y 5 años en el caso de CEMIG D. Eso significa que a lo largo de 4 años cada empresa debe partir del valor actual de pérdidas y alcanzar su meta recorriendo una trayectoria en línea recta. Esa trayectoria definirá las metas intermediarias en cada año del horizonte considerado. Para las empresas eficientes, la trayectoria es una recta de valor constante e igual al valor actual de pérdidas, o sea, las empresas eficientes deberán mantener el índice actual de pérdidas a lo largo del horizonte considerado.

III. METAS ABSOLUTAS

La segunda forma utilizada para obtener las metas de pérdidas está basada en un análisis técnico-económico de obras cuyo objetivo es reducir las pérdidas técnicas. En la definición de metas por análisis técnico-económico el objetivo es obtener el valor óptimo de pérdidas técnicas para determinada distribuidora sin utilizar comparaciones con otras empresas. Es decir que, en este caso, el valor óptimo se constituye de una meta absoluta de pérdidas en tanto que, en el caso de utilización del DEA, la meta obtenida sería relativa (referencial).

El valor óptimo de pérdidas que servirá de meta corresponde al punto de operación económica del sistema. Es el valor a partir del cual cualquier inversión adicional en la red objetivando única y exclusivamente la reducción de pérdidas no será económicamente viable porque el beneficio obtenido con la reducción de pérdidas no compensa la inversión realizada.

El primer paso en este tipo de análisis es seleccionar los tipos de obras que serán estudiadas objetivando la reducción de las pérdidas. Para cada tipo de obra, se debe establecer un método para evaluar la reducción de pérdidas que se puede obtener con su ejecución. En este trabajo las siguientes obras fueron consideradas: refuerzo de la acometida del consumidor, sustitución del medidor de energía del consumidor de baja tensión, determinación de nueva ubicación para el transformador de distribución, sustitución del transformador de distribución, equilibrio de las cargas de media y baja tensión, instalación de capacitores, nuevos alimentadores, refuerzo de las líneas de media y baja tensión y división de la red de baja tensión.

Para evaluar el beneficio en reducción de pérdidas obtenido

con la ejecución de cada obra, se realiza un cálculo inicial de pérdidas para determinar las pérdidas iniciales. En ese cálculo, se utiliza un modelo de cálculo detallado con uso de flujo de potencia y curvas típicas de carga. En seguida, para evaluar el efecto de determinada obra en determinado equipo de red son utilizadas reglas simples para determinar el nuevo valor de pérdidas en el equipo después de la ejecución de la obra. En el caso de obras que comprenden sustitución de transformador o conductor se utilizan técnicas de cálculo de transformador económico y conductor económico [6].

Cada obra es ejecutada de forma automática de acuerdo con la definición de algunas reglas para evitar la ejecución de obras en todos los equipos de red. Básicamente, se debe definir el valor máximo de pérdidas que un equipo debe presentar, así, las obras son simuladas apenas en los equipos que tengan pérdidas más grandes que el valor máximo establecido.

La ejecución automática de obras es fundamental para este tipo de análisis técnico-económico, ya que el volumen de informaciones asociado a las redes de distribución es demasiado grande. Sería imposible realizar todas esas obras en varios equipos de red de forma manual.

Para cada obra que es ejecutada se calculan algunos indicadores económicos como relación beneficio/costo, tasa interna de retorno, tiempo de retorno y tasa de rentabilidad inicial de la inversión. Por lo tanto, es fundamental el conocimiento de los costos involucrados en la ejecución de esas obras.

A partir de los resultados obtenidos, es posible seleccionar apenas las obras económicamente viables y determinar el monto de pérdidas técnicas que podría ser evitado en cada segmento y, de esa forma, determinar el valor óptimo de pérdidas para cada segmento y para la empresa.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

La técnica de Análisis Envoltante de Datos descrita anteriormente para obtención de metas referenciales de pérdidas técnicas fue aplicada a un conjunto de datos de 33 distribuidoras brasileñas. Para ello, se utilizó el software SIAD [1]. La Tabla II presenta los resultados obtenidos.

Analizando los resultados de la Tabla II, se nota que 18 empresas formaron la frontera de eficiencia. Las otras empresas (15) son dichas ineficientes. Se resalta que cada empresa tiene su meta y que no hay necesidad de que ellas alcancen el mismo nivel de pérdidas de una empresa definida como referencia. Otro punto interesante a ser observado es que la empresa de pérdida más pequeña no es la única que tiene eficiencia de 100%. Incluso, hay empresas con pérdidas mucho más grandes que son eficientes, o sea, presentan pérdidas adecuadas a las características de sus sistemas.

Con la utilización del DEA es posible obtener las eficiencias de las empresas con relación al valor practicado de pérdidas y esas eficiencias son utilizadas como medida de desempeño y también para definir la meta de pérdida técnica para alcanzar una eficiencia de 100%. La meta definida de esa forma es más justa ya que mantiene el principio de

comparación entre diferentes empresas, pero considerando las características de sus áreas de concesión.

TABLA II
EFICIENCIAS Y METAS DE PÉRDIDAS CON LA UTILIZACIÓN DEL DEA

Empresa	Pérdidas Técnicas [%]	Eficiencia [%]	Meta [%]
1	6,80	100,0	6,80
2	7,06	100,0	7,06
3	4,97	94,7	4,71
4	6,57	100,0	6,57
5	8,92	78,2	6,97
6	9,07	78,7	7,14
7	6,17	86,5	5,34
8	9,41	100,0	9,41
9	8,21	97,5	8,00
10	9,77	100,0	9,77
11	12,42	100,0	12,42
12	9,86	100,0	9,86
13	9,20	82,9	7,63
14	5,67	100,0	5,67
15	8,63	93,3	8,05
16	9,76	88,7	8,66
17	8,83	89,7	7,92
18	7,15	100,0	7,15
19	8,18	100,0	8,18
20	6,37	100,0	6,37
21	5,61	74,8	4,19
22	4,83	93,9	4,54
23	6,20	100,0	6,20
24	5,68	74,6	4,24
25	6,35	100,0	6,35
26	4,91	100,0	4,91
27	7,02	92,7	6,50
28	4,19	100,0	4,19
29	9,96	100,0	9,96
30	13,81	66,0	9,11
31	5,61	100,0	5,61
32	8,55	100,0	8,55
33	9,91	85,0	8,42

En el caso del análisis técnico-económico, fue desarrollado un software, denominado Pertec AE, para permitir la simulación de las obras mencionadas anteriormente. Se destaca que ese software podrá ser aplicado a cualquier distribuidora, desde que se realicen las modificaciones necesarias en las interfaces con los sistemas corporativos.

Entre las principales características del software Pertec AE se destacan:

- Mecanismos de importación de la base de datos topológica, datos de la carga y de facturación;
- Diagnóstico actual del sistema de distribución con relación a las pérdidas técnicas, permitiendo evaluar el volumen actual, porcentaje relativo a las energías inyectadas (global y en cada segmento) y la contribución de cada segmento en el valor resultante de la pérdida técnica global;
- Realización de proyecciones de mercado durante un periodo de planeamiento específico (de 5 a 10 años), mediante inserción de tasas de crecimiento de la carga;
- Cálculo de las pérdidas técnicas globales y por segmento

del sistema eléctrico (energía y demanda) en el año horizonte de planeamiento y evaluación de las pérdidas (globales y por segmento) en los otros años de estudio;

- Evaluación y proposición del conjunto de acciones de mejora y obras de expansión descrito anteriormente en conformidad con la adopción de criterios técnicos o condiciones específicas para que cada alternativa sea evaluada. Por ejemplo, se puede efectuar una obra de refuerzo en alimentadores que superen un determinado valor porcentual de pérdidas y en los tramos del alimentador que superen el valor máximo pre-establecido de carga porcentual.
- Informes incluyendo resultados técnicos (pérdida original, pérdida después de la obra, reducción de las pérdidas técnicas de energía en kWh y en %), costos e indicadores económicos que ayudan al usuario en la definición del mejor conjunto de obras y acciones;
- Selección de un conjunto adecuado de obras y acciones (por ejemplo, las que presenten relación beneficio/costo superior a 1,0) o cualquier conjunto alternativo de forma a obtener varias trayectorias posibles de evolución de las pérdidas técnicas;
- Selección de un conjunto optimizado de obras, incluyendo la relación de obras y acciones con los mejores indicadores técnico-económicos, que permiten determinar la trayectoria optimizada de pérdidas técnicas de la distribuidora.

Las Figuras 2 a 6 presentan un conjunto de pantallas de la interfaz gráfica de Pertec AE. Las Figuras 2 y 3 muestran la pantalla que permite configurar la ejecución de una simulación. En esa pantalla el usuario indica las subestaciones que desea simular, así como los tipos de obra y sus respectivas reglas de ejecución. Las figuras 4 y 5 exhiben la pantalla de resultados, la cual permite visualizar los resultados de forma global o detallada, permitiendo la selección de cuales subestaciones y cuales tipos de obras registradas en el banco de datos deben ser exhibidas en el informe. A partir de esa pantalla el usuario puede seleccionar un conjunto de obras que atienda a los criterios deseados de relación beneficio/costo, tasa interna de retorno, tasa de rentabilidad inicial de la inversión o tiempo de retorno y, de esa forma, generar el informe de pérdidas optimizadas (Figura 6), el que indica la evolución de las pérdidas caso sean realizadas las obras seleccionadas. Caso el usuario seleccione apenas las obras de relación beneficio/costo superior a 1,0, la trayectoria obtenida será la trayectoria absoluta, con las metas óptimas de pérdidas considerando un análisis técnico-económico.

El software Pertec AE fue utilizado en una aplicación específica comprendiendo la región Mantiqueira de CEMIG D y, en esta simulación inicial, dos subestaciones fueron utilizadas: São João Del Rei 1 (SDEU) y São João Del Rei 2 (SDED). A seguir un breve resumen del sistema eléctrico de la región:

- 46 subestaciones de distribución;
- 161 alimentadores de media tensión;
- 75.688 transformadores de distribución;

- 49.900 redes de baja tensión.

En cuanto a las subestaciones simuladas, se destaca que el sistema eléctrico correspondiente es formado por 13 alimentadores y 8.315 transformadores de distribución, suministrando energía a 68.556 consumidores.

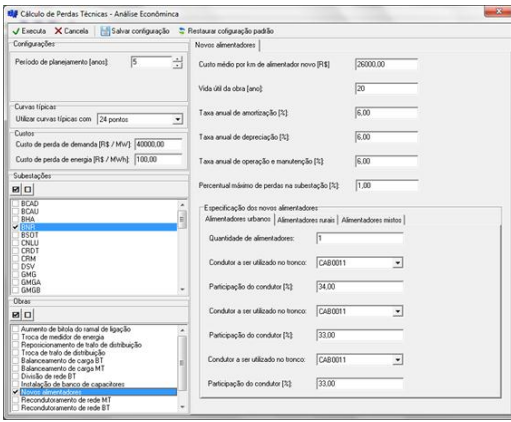


Fig. 2. Pantalla para configuración de reglas de ejecución de la obra “nuevos alimentadores”.

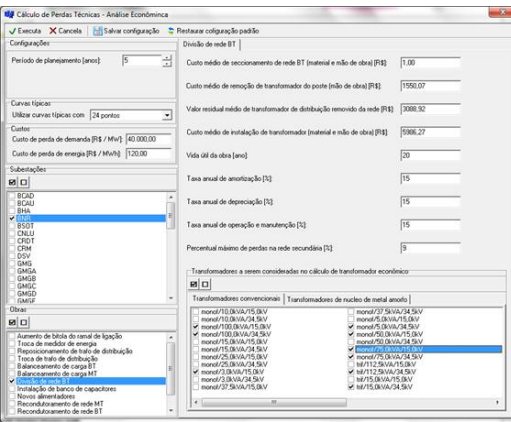


Figura 3. Pantalla para configuración de reglas de ejecución de la obra “división de la red BT”.

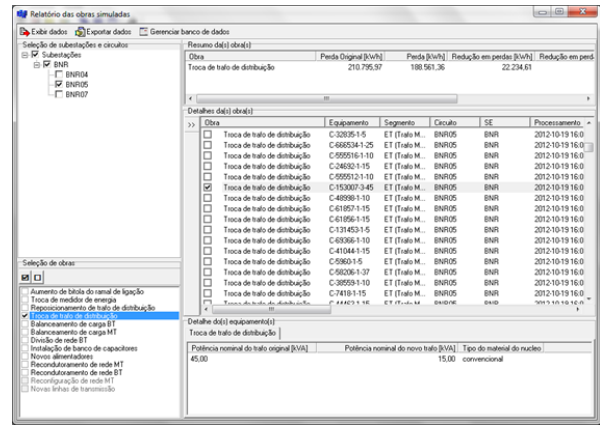


Fig. 5. Pantalla de resultados de un tipo de obra en un alimentador.

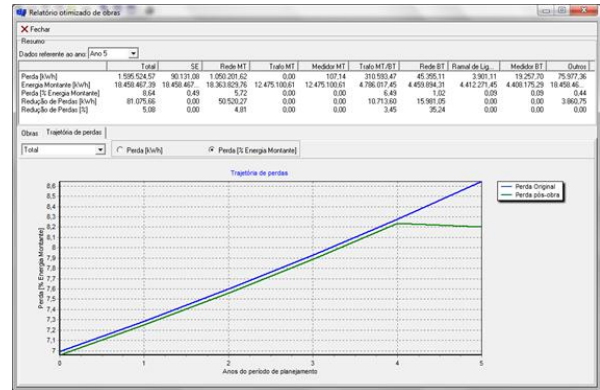


Fig. 6. Pantalla de proyección de pérdidas en el tiempo con y sin la realización de las obras.

De forma resumida, las principales características técnicas y operacionales verificadas en el sistema de distribución de esa área son:

- Alimentadores de media tensión con longitudes elevadas;
- Carga máxima relativamente baja;
- Baja densidad de carga;
- Elevado desequilibrio de la carga;
- Gran número de transformadores de distribución operando en vacío;
- Redes de baja tensión con carga baja.

Los segmentos más representativos en términos de contribución al volumen de pérdidas técnicas fueron los transformadores de distribución (47,15% del total) y los alimentadores de media tensión (26,78%), que son responsables por casi 75% del total de pérdidas.

Los resultados de las simulaciones indicaron los siguientes aspectos:

- Elevado desequilibrio de la carga muestra que una reducción significativa de las pérdidas puede ser obtenida con acciones de equilibrio;
- Conductor económico debe ser observado con destaque que se obtuvo reducción significativa de las pérdidas con la obra de refuerzo en líneas de media tensión, aunque presente una relación beneficio/costo poco atractiva;

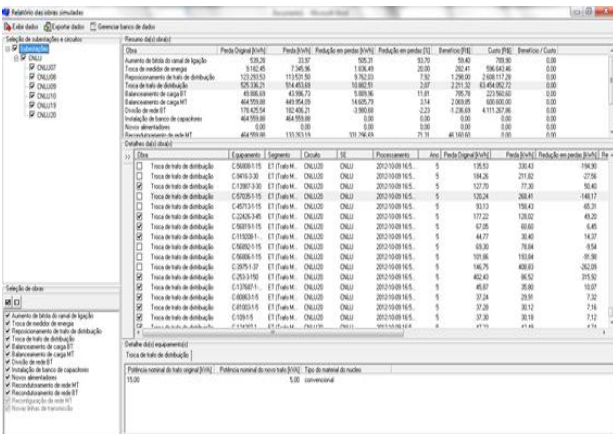


Fig. 4. Pantalla de resultados globales.

- Elevado número de sustitución de transformadores de distribución por otros de potencia más pequeña indica la necesidad de observar con más detalles los proyectos de redes de baja tensión.

Entre tanto, se destaca que ninguna de las acciones de mejora u obras de refuerzo presentó una tasa de rentabilidad inicial de la inversión superior a 1,0 (el valor más grande obtenido fue 0,27), resultado derivado del valor relativamente elevado del costo de las obras para una reducción menos expresiva de las pérdidas técnicas.

Las Figuras 7 y 8 muestran la trayectoria de pérdidas obtenida, respectivamente en kWh/año y en %, considerando el conjunto de obras propuesto y analizado. En las trayectorias presentadas la línea azul indica la trayectoria de pérdidas para las subestaciones SDEU y SDED caso ninguna obra sea realizada. La línea verde indica la trayectoria de pérdidas caso las obras propuestas sean realizadas en los años indicados.

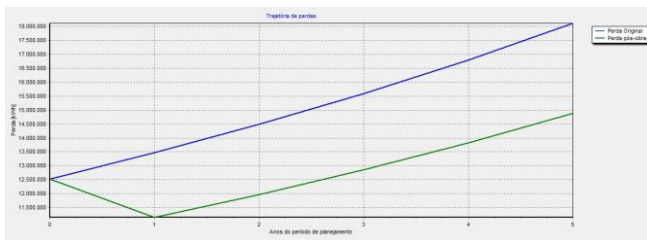


Figura 7. Trayectorias de las pérdidas de energía [kWh/año] para las subestaciones SDEU y SDED.

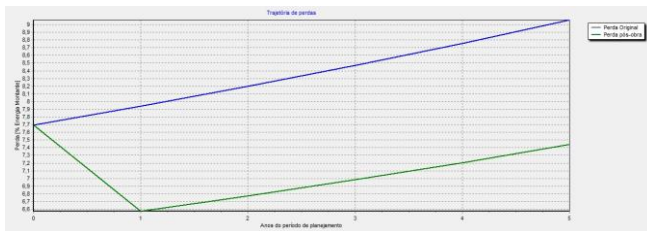


Figura 8. Trayectorias de las pérdidas de energía [%] para las subestaciones SDEU y SDED

V. CONCLUSIONES

En este trabajo fue desarrollado un conjunto de metodologías con el objetivo de establecer metas referenciales y absolutas de pérdidas técnicas y, consecuentemente, permitiendo el establecimiento de trayectorias de reducción de pérdidas.

Para el establecimiento de metas referenciales, se utilizó el método DEA de forma a obtener metas de pérdidas basadas en las eficiencias de las empresas, las cuales son caracterizadas por 5 atributos descriptivos que tienen correlación con las pérdidas técnicas. Con el uso del método propuesto se pasa a utilizar la eficiencia técnica como medida de desempeño y, consecuentemente, se define la meta de pérdida técnica de forma individual. El uso de la propia pérdida como medida de desempeño es inadecuado, ya que es posible que existan empresas con pérdidas bajas, pero ineficientes, como también

es posible que existan empresas con pérdidas elevadas, pero eficientes. Tales hechos dependen solo de las características del área de concesión, en la que se debe esperar valores más grandes de pérdidas en ambientes menos favorecidos. El método DEA permite identificar cual sería el valor adecuado de pérdidas para cada distribuidora de acuerdo con las características de su red, siempre realizando comparaciones con las otras empresas del conjunto de datos analizado.

Para el establecimiento de metas absolutas, fue desarrollado un método basado en un análisis técnico-económico de obras y acciones de mejora objetivando la reducción de pérdidas. Fue desarrollado un software para tornar posible la aplicación de la metodología, lo cual permite realizar varios tipos de obras de forma automática de acuerdo con las reglas establecidas por el usuario. El software también permite seleccionar las obras que tienen más ventajas económicas de forma a obtener el valor ideal de pérdidas o meta absoluta a ser alcanzada por la empresa. Diferente del caso de la meta referencial, en este caso la meta es obtenida utilizando apenas los datos de la distribuidora en análisis y no es realizada una comparación con otras empresas.

Por lo tanto, se cree que CEMIG D pasa a poseer un conjunto de herramientas que le permite obtener los valores adecuados de pérdidas, que son los valores que conducen a la mejor solución en términos de costo, presentando compromiso entre el costo de la operación y las inversiones necesarias para reducir las pérdidas y, de esa forma, beneficiando directamente el consumidor, ya que tales costos tienen impacto directo en la tarifa de energía cobrada.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Angulo Meza, L; Biondi Neto, L.; Soares de Mello, J.C.C.B.; GOMES, E. G. ISYDS – Integrated System for Decision Support (SIAD – Sistema Integrado de Apoio a Decisão): a software package for data envelopment analysis model. *Pesquisa Operacional*, v.25, n.3, p 493-503. 2005.
- [2] Coelli, T. J.; Rao, D. S. P.; O'Donnell, C. J.; Battese, G. E. *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. 2nd Ed. New York: Springer Verlag, 2006.
- [3] Green, P. E. *Mathematical Tools for Applied Multivariate Analysis*. Academic Press, 1976.
- [4] Pessanha, J. F. M. Um modelo de análise envoltória de dados para estabelecimento de metas de continuidade do fornecimento de energia elétrica. 2006. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.
- [5] Gujarati, D. *Econometria Básica*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- [6] Willis, H. L. *Power Distribution Planning Reference Book*, 2nd Edition, Marcel Dekker, 2004.
- [7] Meffe, A.; Antunes, A. U.; Romero, F.; Alves, A. A.; Uyekita, A. H.; Habib, S. C. P.; Rocha, A. F.; Nunes, D. A. Proposição de metodologia para definição de metas e trajetórias de redução de perdas técnicas de energia. VII CIERTEC, Porto Alegre, 2011.

VII. BIOGRAFÍAS



André Meffe was born in São Paulo, Brazil, on April 23th, 1976. He graduated in Electrical Engineering from University of São Paulo in 1998. He received his MSc in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2001 and his PhD in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2006. He has been with the Department of Electrical Engineering at the University of São Paulo from 1999 to 2004, where he worked with researches related to electric distribution systems.

Nowadays, Mr. Méffé is with “Daimon Engenharia e Sistemas”, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects His current research interests include electrical power distribution planning, methodologies for calculating technical losses and technical losses’ targets, service quality and smart grids.



Fabio Romero was born in Uberlândia, Brazil, in 1980. He graduated in Electrical Engineering from the University of Lins, Lins, Brazil, in 2003, and received the MSc degree in Energy from Institute of Energy and Environment of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 2007.

He joined the University of São Paulo in 2004 as Researcher with the Lightning and High Voltage Research Center (CENDAT / USP), and currently is with “Daimon Engenharia e Sistemas”, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects. He is author or coauthor of scientific papers presented at international conferences or published in reviewed journals. His current research interests include electrical power distribution planning, distribution losses, smart grids, protection of distribution lines, grounding, power system electromagnetic transients, grounding, and energy quality.



Alden Uehara Antunes was born in Ilha Solteira, Brazil, on March 10th, 1971. He graduated in Electrical Engineering at the Politechnic School of São Paulo University in 1996. He received his MSc at the Politechnic School of São Paulo University in 1999 and his PhD at the Politechnic School of São Paulo University in 2004. Nowadays, he is with “Daimon Engenharia e Sistemas”, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects.

He has experience in the area of Electrical Engineering with emphasis on the Distribution of Electricity acting mainly on the following topics: Electrical distribution system planning, methodologies for calculating technical losses, protection of primary feeders, service quality and smart grids.



Alessandro Arjona Alves was born in Foz do Iguaçu, Brazil, on July 10th, 1985. He graduated in Electrical Engineering from Universidade Estadual do Oeste do Paraná in 2008. He has been with “Daimon Engenharia e Sistemas” – a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects – from 2010 to 2013, where he worked with researches related to electric distribution systems and developing electrical engineering software.



Saad do Carmo Pereira Habib (32 years old), Engineer of Technology and Standardization at Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig D – since 2006. He worked in the sectors of Distribution Engineering Systems and Expansion Planning of MV and LV Electrical Systems. Currently he is working in the Department of Measurement and Control of Distribution Losses.

Degree in Electrical Engineering with emphasis in Power Systems, at Federal University of Minas Gerais (UFMG) in 2005 and Master in Electrical Engineering from the Pontifical Catholic University of Minas Gerais (PUC - MG) in 2011.



Administration from Fundação Getúlio Vargas (FGV) in 2012.

Armando Fernandes Rocha (45 years old) is a Planning Engineer at Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig D. He worked in the Distribution Sector Projects and in the Sector of Planning and Expansion of Electrical Distribution System. Currently he is working at the Department of Measurement and Control of Distribution Losses. He graduated in Electrical Engineering from the University of Vale do Rio Doce in 1994 and received his MBA post-graduation in Business



R&D projects for utilities companies.

Dário Arantes Nunes was born in Formiga, MG, Brazil, on August 4th, 1950. He graduated from Federal University of Minas Gerais in 1976. He received his MSc in Administration from Catholic University of Minas Gerais in 2007. He worked in telecommunication companies from 1975 to 2004. Nowadays, Mr. Nunes is with “Axxiom Soluções Tecnológicas”, a company specialized in developing engineering software and