



## VII CIERTEC

NOVAS PRÁTICAS E TECNOLOGIAS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL  
DO SETOR ELÉTRICO: QUALIDADE DE ENERGIA E GESTÃO COMERCIAL



Porto Alegre, Brasil – 21 a 23 de Novembro de 2011

### PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE METAS E TRAJETÓRIAS DE REDUÇÃO DE PERDAS TÉCNICAS DE ENERGIA

**Tema: II. Qualidade da Energia: Serviço e Produto – Qualidade do Serviço Técnico**

**Autor/es:** ANDRÉ MEFFE<sup>1</sup> (responsável), ALDEN UEHARA ANTUNES<sup>1</sup>, FABIO ROMERO<sup>1</sup>, ALESSANDRO ARJONA ALVES<sup>1</sup>, ANDERSON HITOSHI UYEKITA<sup>1</sup>, SAAD DO CARMO PEREIRA HABIB<sup>2</sup>, ARMANDO FERNANDES ROCHA<sup>2</sup>, DÁRIO ARANTES NUNES<sup>3</sup>

**Empresa ou Entidade:** <sup>1</sup>Daimon, <sup>2</sup>CEMIG, <sup>3</sup>Axxiom

#### DADOS DO AUTOR RESPONSÁVEL

Nome: André Meffe

Cargo: Gerente de Projetos

Endereço: Av. Paulista 1776 – conjunto 22B – Bela Vista

Telefone: +55 11 3266-2929

Fax: +55 11 3266-2929

E-Mail: [andre.meffe@daimon.com.br](mailto:andre.meffe@daimon.com.br)

**PALAVRAS-CHAVE:** perdas de energia, metas de perdas, trajetórias de redução, análise de eficiência, análise fatorial, análise de *clusters*, análise envoltória de dados.

Um dos principais problemas enfrentados pelo setor elétrico brasileiro são as perdas de energia, as quais se dividem em perdas técnicas e não técnicas. As longas redes de distribuição associadas à baixa densidade de carga são os principais fatores que levam a valores consideráveis de perdas técnicas na distribuição. Entretanto, há de se considerar que cada sistema possui características próprias e que alcançar níveis de perdas mais baixos nem sempre é a forma mais econômica para sua operação. Dessa forma, é fundamental conhecer o nível adequado de perdas, ou seja, o nível de perdas que representaria a eficiência máxima de uma distribuidora considerando as características de sua área de concessão. Para atingir tal objetivo, neste trabalho é elaborada uma lista de atributos visando caracterizar o sistema de distribuição. Os atributos relacionados representam variáveis que poderiam explicar as perdas técnicas. Em seguida, utiliza-se uma técnica de análise multivariada para selecionar quais dos atributos previamente relacionados melhor explicam as perdas. Depois de definidas as variáveis explicativas das perdas técnicas, procede-se a uma análise de *clusters*. O principal objetivo dessa etapa é formar grupos de empresas semelhantes, pois a comparação das perdas entre empresas só é válida quando as distribuidoras são comparáveis, ou seja, quando as características de suas áreas de concessão e de suas redes são similares. Finalmente, utiliza-se uma técnica de análise de eficiência e produtividade para determinar a eficiência de cada empresa quanto ao valor praticado de perdas técnicas. Após o conhecimento da eficiência, é possível determinar as metas de perdas para cada empresa, ou seja, o valor mais adequado para as perdas considerando que a distribuidora possui eficiência máxima. Além disso, propõe-se uma trajetória de redução de perdas. O objetivo deste trabalho é apresentar o procedimento concebido para a escolha das variáveis explicativas das perdas, os métodos para análise de *clusters* e definição das metas de perdas. As variáveis explicativas serão



## VII CIERTEC

### NOVAS PRÁTICAS E TECNOLOGIAS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL DO SETOR ELÉTRICO: QUALIDADE DE ENERGIA E GESTÃO COMERCIAL



Porto Alegre, Brasil – 21 a 23 de Novembro de 2011

apresentadas, bem como os grupos de empresas semelhantes. Finalmente, resultados obtidos com a aplicação da análise de eficiência e produtividade serão apresentados e discutidos.

#### INTRODUÇÃO

Atualmente, as perdas técnicas de energia têm grande relevância no setor elétrico brasileiro. De um lado, as concessionárias buscam efetuar um cálculo cada vez mais preciso e próximo da realidade, uma vez que elas constituem um dos insumos no cálculo das tarifas de energia. Por outro lado, o órgão regulador tem buscado dar tratamento igual a todas as concessionárias no cálculo das perdas técnicas regulatórias, utilizando metodologia própria e simplificada e adotando premissas de cálculo que conduzem a uma rede otimizada, visando evitar que eventuais ingerências por parte das distribuidoras sejam repassadas aos consumidores.

Paralelamente a isso, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – está buscando estabelecer metas de perdas técnicas, além de uma trajetória de redução a ser observada por todas as distribuidoras. Diante desse panorama, fica evidente a importância da definição de metas, a qual deve ser feita da forma mais justa possível.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um arcabouço metodológico que visa a definição de metas de perdas técnicas, bem como a trajetória de redução a ser seguida em determinado horizonte de estudo. O método proposto é baseado na realização de *benchmark* das empresas distribuidoras, comparando-as quando possível e estabelecendo as metas de perdas técnicas com base nas suas eficiências e não apenas nos valores de perdas técnicas.

Para atingir tal objetivo, este trabalho está dividido em três partes. Na primeira parte são definidos os atributos utilizados para caracterizar as distribuidoras. Inicialmente, são relacionados vários atributos que podem explicar as perdas técnicas de alguma forma. Em seguida, a

partir da utilização de uma técnica de análise multivariada, selecionam-se os atributos que melhor descrevem a área de concessão de cada empresa com relação às perdas técnicas.

Na segunda parte, é utilizada uma técnica de análise de *clusters* para identificar os grupos de empresas semelhantes. Nesta etapa são utilizados os atributos definidos na etapa anterior. Com isso, objetiva-se definir os grupos de empresas que podem ser comparadas quanto às perdas técnicas.

Na terceira parte o objetivo é aplicar uma técnica de análise de eficiência e produtividade a cada grupo para determinar o nível de eficiência de cada empresa. Dessa forma, são estabelecidas metas individuais para cada empresa.

Além disso, abandona-se a idéia preconcebida de que a perda técnica reflete o nível de eficiência da empresa, ou seja, busca-se estabelecer um novo conceito de que a perda técnica é função das características da área de concessão e perfil da carga atendida, sendo, portanto, que um valor de perda maior não necessariamente indica um nível de eficiência menor comparativamente a outras distribuidoras, mas que essa análise deve ser enriquecida considerando-se as características técnicas, topológicas e operacionais intrínsecas ao sistema de distribuição de cada empresa de modo a viabilizar uma avaliação eficaz.

Para a realização dos estudos deste trabalho foram utilizados dados de 33 distribuidoras brasileiras.

#### SELEÇÃO DE ATRIBUTOS

Em linhas gerais, pode-se vincular a ocorrência de perdas técnicas nas seguintes partes do sistema de distribuição:

- redes e linhas: perdas que ocorrem nos circuitos de alta, média e baixa tensão, além dos ramais de ligação;



## VII CIERTEC

### NOVAS PRÁTICAS E TECNOLOGIAS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL DO SETOR ELÉTRICO: QUALIDADE DE ENERGIA E GESTÃO COMERCIAL



Porto Alegre, Brasil – 21 a 23 de Novembro de 2011

- transformações: perdas por efeito térmico (cobre) e magnético (ferro) nos transformadores de força ou de distribuição e;
- outras: agregam as perdas nos demais equipamentos (medidores de energia, bancos de capacitores, reguladores de tensão, entre outros) ou que são excessivamente difíceis de serem avaliadas a partir de uma formulação matemática específica, tais como as que ocorrem nos dielétricos de dispositivos, emendas e chaves.

Basicamente, os parâmetros elétricos que tem influência direta no volume de perdas técnicas são: resistência elétrica, carregamento de linhas e transformadores e nível de tensão de operação. Dessa forma, os atributos explicativos inicialmente selecionados devem guardar alguma relação com as perdas de acordo com esse ponto de vista e considerando ainda o conhecimento que se tem a respeito do tema.

#### *Atributos Avaliados*

Inicialmente, foram relacionados 22 atributos explicativos, divididos em 5 grupos: Mercado, Mercado Técnico, Técnico, Técnico Topológico e Topológico.

No grupo Mercado foram classificados 7 atributos: demanda máxima [MW] (DemMax), densidade de energia [MWh/km<sup>2</sup>] (DensEn), quantidade de consumidores BT por transformador MT/BT (NUC/NT), mercado global [MWh] (MerGlob), percentual do mercado global que é destinado aos consumidores BT [%] (MercGlobBT), quantidade de consumidores BT (NUC) e densidade de carga [MW/km<sup>2</sup>] (DensCa).

No grupo Mercado Técnico foram classificados apenas 2 atributos: fator de utilização médio dos transformadores MT/BT [%] (FU) e fator de carga médio ponderado pelo consumo de cada nível de tensão [%] (FC).

No grupo Técnico foram classificados 4 atributos: potência instalada de subestações de distribuição [MVA] (PotInst), perdas não técnicas [%] (PerNtec) e as médias das correntes máximas dos alimentadores em [A] (Imed) e em [%] (Imed%).

No grupo Técnico Topológico foram selecionadas as resistências médias das redes MT (ResMT) e BT (ResBT), ambas em [ $\Omega$ ], e as resistências específicas médias das redes MT (ResMT\_esp) e BT (ResBT\_esp) [ $\Omega$ /km].

Por fim, os parâmetros quantidade de transformadores MT/BT (NTrafo), comprimento total de rede [km] (CompTot), comprimento médio de rede MT [km] (CompMT), comprimento médio de rede BT [km] (CompBT) e comprimento por unidade de área de concessão [km/km<sup>2</sup>] (CompTot/AC), foram selecionados para o grupo Topológico.

Foi aventada a hipótese de se considerar a área de concessão (AC) como um atributo topológico, porém, após análises técnicas, concluiu-se que este parâmetro sozinho não exerce influência significativa na composição das perdas técnicas totais. Sendo assim, a área de concessão foi combinada com outros atributos a fim de produzir variáveis do tipo “densidade” e que, por consequência, possuem relação mais direta com as perdas. Entretanto, cabe ressaltar que os atributos “área de concessão”, “mercado global” e “comprimento total de rede” definem o porte da empresa e poderão ser úteis nas etapas seguintes.

#### *Redução e Seleção de Atributos*

Uma vez definidos os atributos influentes nas perdas técnicas, procede-se à redução dos dados a fim de identificar quais têm maior influência na composição das perdas técnicas. Para este propósito foi utilizada a técnica de análise fatorial (AF). A AF é uma técnica de análise multivariada frequentemente utilizada em estatística cujo



## VII CIERTEC

### NOVAS PRÁTICAS E TECNOLOGIAS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL DO SETOR ELÉTRICO: QUALIDADE DE ENERGIA E GESTÃO COMERCIAL



Porto Alegre, Brasil – 21 a 23 de Novembro de 2011

objetivo principal é estudar o comportamento de um conjunto de variáveis em covariação com outras [1]. A técnica parte da estrutura de dependência existente entre as variáveis de interesse, permitindo a criação de um conjunto menor de dados (fatores) obtidos em função das variáveis originais.

As simulações apresentadas neste trabalho foram realizadas através do *software* SAS 4.2. De um modo geral, o procedimento de redução dos dados consiste em, primeiramente, realizar a análise fatorial em cada um dos 5 grupos definidos avaliando as possíveis correlações existentes entre as variáveis do mesmo grupo e determinando, quando cabível, a redução ou agrupamento dos dados. Concluída esta etapa, os atributos selecionados em cada grupo são submetidos a uma análise fatorial geral com o intuito de averiguar as possíveis inter-relações existentes entre eles. Por fim, obtém-se um conjunto de atributos com características distintas e que estatisticamente têm influência na composição das perdas técnicas. Para comparação e agrupamento das distribuidoras, analisa-se tecnicamente o conjunto de variáveis selecionadas a fim de definir quais devem ser utilizadas como parâmetro fundamental na análise de clusters.

Em cada processo de análise fatorial são avaliados os valores de MSA de cada variável e do conjunto de variáveis, o agrupamento de variáveis em cada fator e, por fim, as correlações entre as variáveis.

O MSA (*Kaiser's Measure of Sampling Adequacy*) varia de 0 a 1, sendo valores considerados aceitáveis acima de 0,5. Conjunto de variáveis com  $MSA < 0,5$  indicam que a amostra analisada é pobre e, portanto, o atributo com menor valor de MSA é descartado da análise do grupo e selecionado para a análise fatorial geral. Repete-se este procedimento até que todas as variáveis tenham valor de  $MSA \geq 0,5$ .

Se todos os atributos analisados apresentarem valores de MSA aceitáveis, avalia-se a carga fatorial de cada atributo.

Por fim, são analisadas as correlações existentes entre as variáveis que apresentaram alta carga fatorial.

#### *Atributos Selecionados*

Neste item é apresentado, a título de exemplo, o procedimento de redução de atributos aplicado ao grupo Mercado. Por fim, é definido o conjunto de atributos influentes nas perdas técnicas e selecionados aqueles que serão utilizados no agrupamento das distribuidoras.

No grupo Mercado foram definidos 7 atributos. São eles: DemMax, DensEn, NUC/NT, MerGlob, MercGlobBT, NUC e DensCa. Na primeira análise todas as variáveis apresentaram  $MSA > 0,5$  e o valor do conjunto foi igual a 0,69. Dessa forma, deu-se sequência à análise fatorial. As variáveis foram agrupadas em 4 fatores, sendo que três variáveis apresentaram alta carga fatorial com o Fator 1 e duas com o Fator 2, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1 – Atributos com alta carga fatorial no grupo Mercado

Fator 1		Fator 2	
Variável	Carga	Variável	Carga
DemMax	0,89	DensEn	0,96
NUC	0,89	DensCa	0,95
MerGlob	0,87		

Da matriz de correlações observou-se que os atributos do Fator 1 (Tabela 1) têm alta correlação entre si, sendo MercGlob selecionado para representar este conjunto de dados. No Fator 2, a correlação entre os atributos foi de 0,99 e a densidade de energia foi selecionada para representar este conjunto de variáveis no próximo passo da análise. Os demais atributos do grupo Mercado apresentaram baixo valor de carga fatorial e, portanto, foram selecionados para o próximo passo da análise.

Seguindo com o processo de redução de variáveis, aplicou-se análise fatorial nos



## VII CIERTEC

### NOVAS PRÁTICAS E TECNOLOGIAS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL DO SETOR ELÉTRICO: QUALIDADE DE ENERGIA E GESTÃO COMERCIAL



Porto Alegre, Brasil – 21 a 23 de Novembro de 2011

dados selecionados anteriormente: MercGlob, DensEn, NUC/NT e MercGlobBT. Neste caso, o atributo MercGlobBT apresentou  $MSA = 0,31$  e foi selecionado para a análise fatorial geral. Na sequência, as simulações mostraram que, apesar dos atributos MercGlob, DensEn e NUC/NT serem agrupados em um único fator, houve baixa correlação entre eles. Sendo assim, 4 atributos foram finalmente selecionados para representar o grupo Mercado na análise fatorial geral: MercGlobBT, DensEn, NUC/NT e MercGlob.

O mesmo procedimento de análise fatorial foi aplicado aos grupos Mercado Técnico, Técnico, Técnico Topológico e Topológico, resultando em 17 atributos selecionados para a análise fatorial geral: MercGlobBT, DensEn, NUC/NT e MercGlob (grupo Mercado); FU e FC (Mercado Técnico); PerNtec, Imed% e PotInst (Técnico); ResBT, ResMT, ResBT\_esp e ResMT\_esp (Técnico Topológico) e CompBT, CompMT, CompTot e CompTot/AC (Topológico).

Após a análise fatorial geral, foram selecionados 14 atributos como representativos das características das perdas técnicas, ou seja, dos 22 atributos avaliados inicialmente, foram selecionados 14. Na Tabela 2 têm-se as correlações desses atributos com a variável parcial (Perda).

Após minuciosa análise técnica nos resultados da Tabela 2, foram selecionados 6 atributos como parâmetros de referência para o processo de análise de *clusters* (agrupamento) das distribuidoras: DensEn, MercGlobBT, PerNec, ResMT\_esp, ResBT\_esp e CompTot/AC. Os atributos relacionados às resistências específicas das redes de MT e BT – respectivamente ResMT\_esp e ResBT\_esp – foram agregados em uma única variável obtida a partir da média ponderada pelos comprimentos médios de redes MT e BT (ResMTBT\_esp). Os demais atributos não foram selecionados

por apresentarem baixa correlação com a perda técnica (por exemplo, o atributo FC) ou por não apresentarem um comportamento esperado, como é o caso de MercGlob, FU e Imed% que, de acordo com os resultados da Tabela 2, não estão positivamente correlacionados com o crescimento da perda técnica.

Tabela 2 – Correlações entre os Atributos Selecionados e a Perda Técnica

Atributo	Correlação com Perda
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

Os comprimentos médios das redes MT e BT (CompMT e CompBT), apesar de apresentarem bons resultados, não foram selecionados para a análise de *clusters* pois a influência do comprimento de rede na composição das perdas técnicas está representado pelo atributo CompTot/AC.

Além dos 6 atributos mencionados, também foram incluídos os atributos que definem o porte da empresa (MercGlob, CompTot e AC), sendo que dois deles estavam na Tabela 2 e haviam sido excluídos do ponto de vista da representação das empresas quanto às perdas. A inclusão desses 3 atributos é conveniente para a próxima etapa do trabalho (agrupamento de empresas semelhantes).

É importante ressaltar que foram



observadas correlações baixas entre a maioria desses atributos e as perdas técnicas, fato que não era esperado no início do estudo. Entretanto, deve-se notar que as perdas técnicas totais são compostas de várias parcelas relativas às perdas de cada segmento, cada qual possuindo um grau de relação diferenciado com cada atributo da Tabela 2. Além disso, os dados de perdas técnicas apresentados neste trabalho se referem às perdas técnicas regulatórias e podem não representar de forma adequada os percentuais de perdas técnicas encontrados na prática. Tendo em vista que na última etapa do trabalho (definição de metas) a quantidade de variáveis utilizadas é um fator restritivo, optou-se por uma redução ainda maior no número de atributos inicialmente selecionados pela análise fatorial.

### FORMAÇÃO DE GRUPOS

Uma vez definidas as variáveis que realmente explicam as perdas técnicas, deve-se agrupar as empresas de distribuição em função da similaridade de suas variáveis (atributos influentes nas perdas).

O agrupamento, ou *clusterização*, visa dividir um conjunto de observações em grupos homogêneos (similares), segundo algum critério conveniente de similaridade. Assim, os elementos pertencentes a um mesmo grupo serão homogêneos entre si, com respeito a certas características medidas, enquanto que os pertencentes a grupos diferentes deverão ser heterogêneos entre si com relação às mesmas características.

Um dos aspectos determinantes na *clusterização* são as medidas de similaridade. Estão disponíveis várias medidas de similaridade para serem utilizadas nos métodos de *clusterização*. A mais comum e intuitiva é a distância euclidiana. Entretanto, essa medida é aplicável apenas às variáveis métricas (por exemplo, a altura de uma pessoa). As medidas de similaridade são sensíveis à dimensão dos dados. Caso sejam utilizadas variáveis em diferentes unidades, é

recomendável a aplicação de algum procedimento de normalização [4].

Após a definição das variáveis e a construção de uma matriz de similaridade, pode-se, então, aplicar uma técnica para agrupamento de dados. Existem inúmeros métodos de *clusterização* disponíveis na literatura, sendo possível classificá-los como hierárquicos e não-hierárquicos [4, 6, 8].

Um dos algoritmos hierárquicos mais utilizados na literatura é o método de Ward. No método de Ward – ou método de mínima variância – o objetivo é minimizar o crescimento da soma dos erros quadráticos nos *clusters*. O processo se inicia considerando cada objeto a ser agrupado como um *cluster* e termina quando todos os objetos estiverem classificados em um único *cluster*. Os *clusters* são formados de acordo com o critério de minimização da soma dos erros quadráticos nos *clusters*. Assim que um *cluster* é composto, deve-se calcular seu centróide a partir de seus indivíduos.

Os métodos não-hierárquicos designam objetos a *clusters* a partir de um número predefinido de *clusters*. O algoritmo clássico mais conhecido é o método estatístico *k-Means* (*k-Médias*). O *k-Means* talvez seja um dos mais utilizados quando se deseja agrupar muitos dados com pequenas variações. O critério mais utilizado de homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre os grupos é o da soma dos quadrados residual baseado na Análise de Variância. Assim, quanto melhor for este valor, mais homogêneos são os elementos dentro de cada grupo e melhor é a partição [8].

Não há como definir, previamente, qual tipo de *clusterização* é mais eficiente. O tipo apropriado dependerá da aplicação em estudo. Os métodos hierárquicos foram mais utilizados inicialmente, principalmente por serem mais rápidos. Contudo, estes métodos podem ser enganosos, pois combinações iniciais indesejáveis podem persistir na análise e conduzir a resultados ruins [4, 6].

Com o avanço da computação, os

métodos não-hierárquicos têm sido cada vez mais aplicados. Seu uso, porém, depende da habilidade do pesquisador para selecionar o número de *clusters* de entrada de acordo com alguma base prática, objetiva ou teórica. Quando bem aplicados, os resultados são menos susceptíveis a dados discrepantes, à medida de similaridade adotada e à inclusão de variáveis irrelevantes ou inadequadas [4].

No caso do presente trabalho, o método de Ward e o método *k*-Médias foram utilizados para formar grupos de empresas semelhantes. A partir dos resultados obtidos, observou-se que o *k*-Médias é muito sensível ao sorteio inicial das sementes, de forma que cada vez que é executado produz um resultado diferente. Por essa razão, o método de Ward foi escolhido para a formação de grupos. A Figura 1 mostra o dendograma obtido a partir da aplicação do método de Ward ao conjunto de dados analisados (foram considerados 8 atributos, sendo que 3 deles definem o porte da empresa).

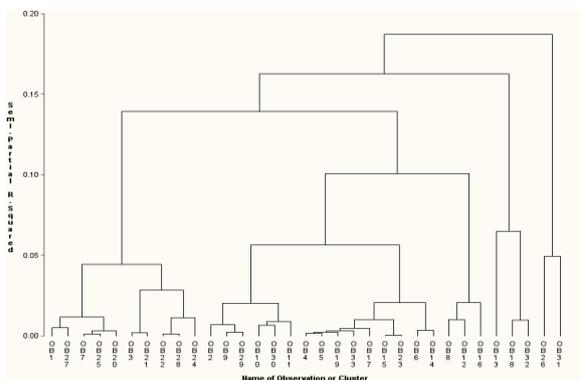


Figura 1 – Dendograma Obtido com o Método de Ward

A partir da análise do dendograma obtido, procurou-se escolher um número de grupos que não fosse muito grande, mas que também não comprometesse sua homogeneidade. Assim, optou-se por trabalhar com 4 grupos de empresas. O Grupo A foi formado por 10 empresas: 1, 27, 7, 25, 20, 3, 21, 22, 28 e 24. Já o grupo B foi formado por 18 empresas: 2, 9, 29, 10, 30,

11, 4, 5, 19, 33, 17, 15, 23, 6, 14, 8, 12 e 16. No Grupo C permaneceram 3 empresas: 13, 18 e 32. Finalmente, o grupo D possui apenas 2 empresas: 26 e 31.

#### DEFINIÇÃO DE METAS E TRAJETÓRIAS DE REDUÇÃO

Depois de identificados os *clusters*, procede-se a uma análise comparativa dos desempenhos das empresas, ou seja, aplica-se um processo de *benchmarking* e então se estabelece uma meta de perdas às empresas do *cluster*. Na literatura observam-se diferentes técnicas de *benchmarking*, sendo frequentemente utilizados a teoria do *Yardstick Competition* e o modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) [1].

De forma geral, na *Yardstick Competition* o usuário cria subconjuntos (*clusters*) de concessionárias com características semelhantes e define uma empresa modelo, uma espécie de *benchmark* contra o qual as empresas classificadas em um mesmo *cluster* devem competir [7].

No caso das perdas técnicas, a aplicação da *Yardstick Competition* envolve a identificação de *clusters* de empresas distribuidoras com características semelhantes. Em cada *cluster* identificado procede-se a uma análise comparativa dos indicadores de perdas de suas empresas, a partir da qual se estabelece uma meta de perdas comum às empresas classificadas no *cluster*. As metas podem ser definidas pelos menores valores observados de perdas (melhor desempenho) ou pelos valores médios ou medianos destes indicadores.

O DEA (do inglês, *Data Envelopment Analysis*) é uma técnica para monitoramento de eficiência e produtividade de unidades de decisão (empresas), que fornece dados quantitativos sobre possíveis direções para a melhoria dessas unidades quando ineficientes. A técnica está baseada no conceito de que, em um processo produtivo, um conjunto de insumos gera um conjunto de produtos mediante tecnologia existente. Há

várias formas de realizar essa transformação, porém a tecnologia existente é um fator limitante. A Figura 2 destaca uma área cinza no gráfico, que é definida como Conjunto de Possibilidade de Produção (CPP). O CPP contempla as várias formas de transformação de insumos em produtos, sendo limitado por uma função de fronteira que é determinada pela tecnologia existente [5].

Analisando-se a Figura 2, nota-se que a empresa A, localizada no interior do CPP, poderia produzir uma quantidade de produtos igual à da empresa B sem alterar a quantidade de insumos. Alternativamente, a empresa A poderia gerar a mesma quantidade de produtos que a empresa C gera, porém com uma quantidade menor de insumos. Dessa forma, diz-se que a empresa A não é eficiente quando comparada às empresas B e C. Já as empresas B e C, localizadas na fronteira do CPP, são ditas eficientes.

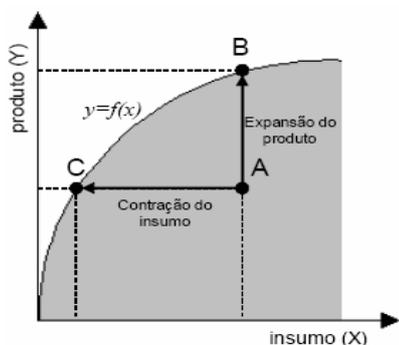


Figura 2 – Conjunto de Possibilidade de Produção

O método DEA utiliza técnicas de programação linear para calcular um índice de eficiência que compara o desempenho atual de uma empresa com a combinação convexa mais eficiente das outras observações insumos/produtos. O índice assume o valor de 1 para as unidades cuja produtividade é “melhor” e menos de 1 para as unidades ditas ineficientes.

É importante notar que as empresas não eficientes estão posicionadas abaixo da curva, envolvidas pelo desempenho das

empresas eficientes. O método define, então, unidades de referência para cada observação, o que permite calcular os aumentos de produtos ou diminuição de insumos necessários para que o “processo produtivo” seja otimizado.

As principais vantagens do DEA são:

- a eficiência de cada empresa é definida de forma individualizada, considerando a atuação das demais empresas em estudo, porém permitindo a maximização de sua eficiência relativa;
- mais de uma empresa pode ser classificada como eficiente, compondo a fronteira de eficiência relativa e servindo como referência para a atuação das demais empresas;
- para as empresas consideradas ineficientes, são estabelecidas metas individuais.

A aplicação do DEA só é possível quando o número de empresas é pelo menos 3 vezes maior que o número de atributos [2]. Do contrário, não existirá número de observações suficientes para definir um CPP com respectiva fronteira de eficiência. Dessa forma, a tendência é que a região de fronteira de eficiência seja definida por grande quantidade de empresas, fato indesejável para este estudo.

Por esse motivo, não foi possível aplicar a técnica por grupo de empresas, visto que há grupos formados com apenas 3 empresas. Também foi por essa razão que se optou por uma redução adicional do número de atributos após o término da análise fatorial. Com isso, decidiu-se aplicar o DEA ao conjunto de empresas como um todo e ao Grupo B, o qual possui 18 empresas. O modelo utilizado é o CRS (Retorno Constante de Escala).

Outro ponto a destacar é que a variável produto é a perda técnica e esta é um produto indesejável. Como o DEA visa minimizar os insumos ou maximizar os produtos, é necessário realizar uma transformação da variável perda técnica. A transformação



## VII CIERTEC

### NOVAS PRÁTICAS E TECNOLOGIAS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL DO SETOR ELÉTRICO: QUALIDADE DE ENERGIA E GESTÃO COMERCIAL



Porto Alegre, Brasil – 21 a 23 de Novembro de 2011

utilizada neste trabalho foi o inverso da perda. Assim, quanto menor a perda, maior o seu inverso, ou seja, maior o produto. A Tabela 3 mostra os resultados de eficiências e metas obtidas quando o DEA é aplicado a todas as empresas do conjunto de dados (são exibidos apenas os dados das empresas do Grupo B). A Tabela 4 mostra os resultados obtidos quando o DEA é aplicado apenas às empresas do Grupo B.

Analisando-se os resultados da Tabela 4, nota-se que 8 empresas compuseram a fronteira de eficiência, sendo que as demais (10) são tidas como ineficientes. Vale ressaltar que cada empresa possui sua meta e que não há necessidade de que elas atinjam o mesmo nível de perdas da empresa com o menor valor dentro do grupo. Além disso, resalta-se que a empresa de menor perda não é a única que possui eficiência de 100%.

Tabela 3 – Eficiências e Metas (DEA)  
Aplicado a todas as Empresas)

Empresa	Perdas Técnicas [%]	Eficiência [pu]	Meta [%]
2	7,06	0,6056	4,28
9	8,21	0,6179	5,07
29	9,96	0,6639	6,61
10	9,77	1,0000	9,77
30	13,81	0,7828	10,81
11	12,42	0,6756	8,39
4	5,50	0,8426	4,64
5	8,92	0,6289	5,61
19	8,18	0,9425	7,71
33	9,91	0,7488	7,42
17	10,06	0,6903	6,94
15	8,63	1,0000	8,63
23	7,51	1,0000	7,51
6	9,07	0,5463	4,95
14	5,72	0,6898	3,95
8	9,95	1,0000	9,95
12	9,86	1,0000	9,86
16	9,76	1,0000	9,76

Ao analisar os resultados da Tabela 3, nota-se que há empresas com eficiência baixa, da ordem de 60%. Consequentemente, tal fato se traduz em metas mais rígidas e talvez inatingíveis. Ainda, algumas empresas

que eram eficientes na Tabela 4 passaram a ser ineficientes na Tabela 3. Isso acontece porque a inclusão de mais empresas na análise define outra fronteira de eficiência e, com isso, as eficiências relativas de cada empresa se alteram.

Tabela 4 – Eficiências e Metas (DEA)  
Aplicado às Empresas do Grupo B)

Empresa	Perdas Técnicas [%]	Eficiência [pu]	Meta [%]
2	7,06	0,9216	6,51
9	8,21	0,7560	6,21
29	9,96	0,7679	7,65
10	9,77	1,0000	9,77
30	13,81	0,7828	10,81
11	12,42	0,6756	8,39
4	5,50	1,0000	5,50
5	8,92	0,7959	7,10
19	8,18	1,0000	8,18
33	9,91	0,8326	8,25
17	10,06	0,7663	7,71
15	8,63	1,0000	8,63
23	7,51	1,0000	7,51
6	9,07	0,9640	8,74
14	5,72	0,9504	5,44
8	9,95	1,0000	9,95
12	9,86	1,0000	9,86
16	9,76	1,0000	9,76

Uma vez estabelecidas as metas, deve-se definir a trajetória de redução de perdas, ou seja, em qual horizonte tal meta deverá ser alcançada. Além disso, a trajetória também define metas intermediárias. Tendo em vista que o processo de revisão tarifária no Brasil é realizado a cada 4 anos, é conveniente considerar tal horizonte para o estabelecimento da trajetória. Desde o ano inicial até o ano horizonte, a trajetória pode ser definida como uma reta, uma curva exponencial ou uma curva personalizada. Neste trabalho propõe-se a utilização de uma reta, uma vez que a redução de perdas é sempre uma tarefa árdua. Teoricamente, uma redução linear ao longo do horizonte pode ser mais fácil de gerenciar por parte das empresas.



## VII CIERTEC

### NOVAS PRÁTICAS E TECNOLOGIAS PARA UM FUTURO SUSTENTÁVEL DO SETOR ELÉTRICO: QUALIDADE DE ENERGIA E GESTÃO COMERCIAL



Porto Alegre, Brasil – 21 a 23 de Novembro de 2011

#### CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um novo arcabouço metodológico para a definição de metas e trajetórias de redução de perdas técnicas.

É extremamente importante ressaltar que os resultados obtidos são preliminares e que tais estudos estão sendo conduzidos no âmbito de um projeto de P&D com a CEMIG. As principais dificuldades esbarram no baixo número de empresas consideradas devido à baixa disponibilidade de dados, o que impossibilita análises mais detalhadas.

Nas próximas etapas do trabalho será buscado um maior número de observações no conjunto de dados utilizados. Isso poderá ser feito através de duas frentes. Na primeira, busca-se a participação de mais empresas neste estudo. Na segunda frente, busca-se abrir os dados de cada empresa por regional, encarando-se cada regional como uma empresa independente.

Embora os resultados apresentados sejam preliminares e ainda careçam de mais estudos, observa-se que a aplicação do DEA é promissora e pode representar uma alternativa real como método para estabelecimento de metas de perdas técnicas. Para isso, 3 pontos são fundamentais e necessitam de mais investigação: a escolha dos atributos, a formação dos grupos e a transformação da variável perda para utilização como produto na aplicação do DEA. Ainda, além do CRS, outros modelos de DEA serão estudados.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CHARNES, A.; COOPER, W. W.;

RHODES, E. Measuring the Efficiency of Decision Making Units. *European Journal of Operational Research*. No. 2, p. 429-444, 1978.

[2] COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; O'DONNELL, C. J.; BATTESE, G. E. *An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis*. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: Springer Verlag, 2006.

[3] GREEN, P. E. *Mathematical Tools for Applied Multivariate Analysis*. Academic Press, 1976.

[4] HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAN, R. L.; BLACK, W. C. *Análise multivariada de dados*. 5<sup>a</sup> Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

[5] 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.

[6] QUEIROZ, L. M. O. Estimacão e análise das perdas técnicas na distribuição de energia elétrica. 2010. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.

[7] RUDNICK, H.; DONOSO, J.A. Integration of Price Cap and Yardstick Competition Schemes in Electrical Distribution Regulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.15, n.4, p. 1428-1433, november 2000.

[8] XU, R.; WUNCISH II, D. C. *Clustering*. Wiley, 2009.