

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Análise da produtividade das distribuidoras de
energia elétrica utilizando Índice Malmquist e o método
de *bootstrap***

Fernando Elias Domingos da Silva Sé

Itajubá, junho de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Análise da produtividade das distribuidoras de
energia elétrica utilizando Índice Malmquist e o método
de *bootstrap***

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Itajubá
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em
Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:
José Wanderley Marangon Lima

Fernando Elias Domingos da Silva Sé

Itajubá, junho de 2012

Agradecimentos

Aos meus pais Fernando e Fátima e aos meus irmãos Manoel, Naíra e Érica pelo amor e apoio incondicional de cada um, sem os quais não estaria realizando este feito.

Aos meus amigos Tiago e Francisco que desde o início do mestrado me incentivaram e me deram força para continuar com os estudos e nunca desanimar.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Wanderley Marangon Lima, que me deu a honrosa oportunidade de trabalhar ao seu lado, e pelas significativas orientações ao longo deste trabalho.

Aproveito para registrar meu forte agradecimento ao Prof. Dr. Rafael Leme que se dedicou com muita disposição para a realização deste trabalho, sempre com muita sabedoria, paciência e companheirismo.

Ao meu amigo e incentivador Dr. Paulo Steele, com quem aprendi e continuo aprendendo sobre o mundo das tarifas de distribuição de energia.

E por fim, agradeço a minha noiva Tabatha pelo amor, companheirismo e incentivos durante a realização desta dissertação.

Resumo

O setor de distribuição de energia elétrica brasileiro está passando pelo terceiro ciclo de revisão tarifária periódica, conduzida pelo órgão regulador, com o intuito de redefinir as tarifas reguladas a serem praticadas neste mercado, estritamente monopolístico, e também com intuito de introduzir mecanismos para que as empresas distribuidoras busquem maiores ganhos de eficiência e produtividade.

Uma das melhorias propostas pelo regulador, nesta revisão tarifária corrente, concerne na aplicação da Produtividade Total dos Fatores para a definição da produtividade das distribuidoras, no âmbito da determinação do Fator X, dentro do contexto da regulação por incentivos.

Assim, considerando-se esta nova aplicação em curso, neste trabalho, a metodologia DEA (*Data Envelopment Analysis*) e o Índice Malmquist combinados com o método *bootstrap*, são utilizados a fim de se prover as devidas inferências estatísticas para se determinar a eficiência e a produtividade médias das distribuidoras de energia elétrica brasileiras.

As análises compreendem o período entre 2003 e 2009, o mesmo utilizado pelo regulador, e os resultados alcançados indicam que existe um significativo grau de ineficiência (aproximadamente 34,1%) e uma ganho de produtividade médio de 1,55%.

Portanto, este estudo indica que há, em teoria, um grande potencial para redução de custos operacionais e melhoria na produtividade média do setor de distribuição de energia elétrica brasileiro.

Abstract

The Brazilian electricity distribution industry is passing through the third price control review, conducted by the Regulator, in an attempt to prevent monopoly gains and to induce improvements in productivity and efficiency to the distribution companies, since they are natural monopolies.

One of the improvements established by the regulator, in this current review, concerns to the application of the Total Productivity Factor to the definition of the productivity of the utilities, in order to calculate the x factor, within the context of incentive regulation.

Therefore, considering this new proposal presented by the regulator, in this work, DEA (Data Envelopment Analysis) and a Malmquist Index are combined with a *bootstrap*

method in order to provide statistical inferences to determine the mean efficiency and productivity of Brazilian's distribution utilities.

The analysis comprises the period between 2003 and 2009, the same used by the regulator, and the results indicate that there is a significant degree of inefficiency (approximately 34,1%) and an average productivity progress of 1,55%.

Thus, this work reveals that there is, in theory, a great potential for operational cost savings and productivity improvements in Brazilian electricity distribution market.

Índice Analítico

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto e Motivação da Pesquisa.....	3
1.2	Organização dos Capítulos	4
2	REGULAÇÃO POR INCENTIVOS – CONTEXTO BRASILEIRO	6
2.1	Visão Geral da Regulação Econômica de Distribuição de Energia Elétrica.....	9
2.2	Revisão Tarifária Periódica	13
3	CÁLCULO DA EFICIÊNCIA POR MEIO DA APLICAÇÃO DE ANÁLISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS - DEA	17
3.1	Modelo Multiplicador DEA	23
3.2	Modelo DEA de Envolvimento	26
3.3	Modelos DEA com Retorno Variável de Escala	28
3.4	Exemplos de aplicação	33
4	MENSURAÇÃO DA PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES DAS DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA	39
4.1	Calculo do Índice de Produtividade Malmquist	39
4.2	Método DEA Malmquist	44
4.3	Exemplo de Aplicação	47
5	INFERÊNCIAS ESTATÍSTICAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE <i>BOOTSTRAP</i> (REAMOSTRAGEM)	50
5.1	Correção de viés por <i>bootstrap</i>	53
5.2	Bootstrapping DEA	54
5.3	Caso exemplo de aplicação de <i>bootstrap</i> nos Índices Malmquist	56
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	58

6.1	Base de dados utilizada.....	58
6.2	Estimativa de Eficiência das Distribuidoras através da metodologia DEA.....	61
6.2.1	Inferência Estatística através de <i>Bootstrap</i>	64
6.3	Índices de Produtividade Malmquist	66
6.3.1	Inferência estatística através de <i>Bootstrap</i>	68
6.4	Conclusões dos Resultados	73
7	CONCLUSÕES GERAIS.....	75
7.1	Conclusão	75
7.2	Trabalhos Futuros.....	77

Lista de Figuras

Figura 1 – Regime de Regulação por Preços Máximos (*Price-Cap*)

Figura 2 – Ganho de Escala

Erro! Fonte de referência não encontrada.

Figura 4 – Exemplo de Fronteira de Eficiência

Figura 5 - Retorno Constante de Escala

Figura 6 - Retornos de escala não-constantemente para a Fronteira de Produtividade: (a) retorno crescente de escala; (b) retorno decrescente de escala; e (c) retorno variável de escala.

Figura 7 - Retorno Variável de Escala

Erro! Fonte de referência não encontrada.

Erro! Fonte de referência não encontrada.

Figura 9 – Resultados do Índice de Malmquist e suas decomposições do caso exemplo

Erro! Fonte de referência não encontrada.

Figura 12 - Índice Malmquist e suas decomposições ao longo de 2003 a 2009

Figura 13 – Índices de Produtividade enviesado e corrigido

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Composição da receita de uma distribuidora de energia elétrica.....	10
Tabela 2 - Definição das Parcelas A e B nos processos de revisão e reajuste tarifário...	12
Tabela 3 – Casos exemplos.....	34
Tabela 4 – Dados parciais das Distribuidoras (Caso 1).....	34
Tabela 5 - Resultados DEA CRS e DRS (Caso 1)	35
Tabela 6 - Dados parciais das Distribuidoras (Caso 2)	35
Tabela 7 - Resultados DEA CRS e VRS (Caso 2)	36
Tabela 8 - Dados parciais das Distribuidoras (Caso 3)	37
Tabela 9 – Resultados DEA VRS orientado a produto	38
Tabela 10 – Dados parciais das distribuidoras para o caso exemplo	47
Tabela 11 – Produtividade Média Anual.....	49
Tabela 12 – Índices Malmquist com os respectivos intervalos de confiança (caso exemplo)	57
Tabela 13 - Distribuidoras - Monopólio Natural Forte.....	59
Tabela 14 – Relação de insumos e produtos	60
Tabela 15 - Principais informações estatísticas dos dados utilizados no estudo	60
Tabela 16 – Índices de Eficiências.....	62
Tabela 17 – Índice de Eficiência das Distribuidoras após aplicação de <i>Bootstrap</i>	64
Tabela 18 – ganho de produtividade das distribuidoras entre 2003 e 2009.....	67
Tabela 19 – Ganhos Médios de Produtividade das Distribuidoras (2003-2009)	67
Tabela 20 – Estimativa dos Ganhos de Produtividade das Distribuidoras considerando o <i>bootstrap</i> com B=3.000	70
Tabela 21 – Estimativa dos Ganhos de Produtividade das Distribuidoras considerando o <i>bootstrap</i> com B=3.000 e a aproximação proposta	71

Lista de Abreviaturas

3CRTP – Terceiro Ciclo de Revisão Tarifária Periódica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CAPEX – Capital Expenditure (Custos de Capital)

CRS – Constant Return to Scale (Retorno Constante de Escala)

DEA – Data Envelopment Analysis (Análise de Envelopamento de Dados)

DMU – Decision Making Units (Unidades de Decisão)

DRS – Decreasing Return to Scale (Retorno Decrescente de Escala)

ET – Evolução Técnica

FCD – Fluxo de Caixa Descontado

GE – Ganhos de Escala

IRS – Increasing Return to Scale (Retorno Crescente de Escala)

NDRS – Non-Decreasing Return to Scale (Retorno não Decrescente de Escala)

NIRS – Non-Increasing Return to Scale (Retorno não Crescente de Escala)

OPEX – Operational Expenditures (Custos Operacionais)

PTF – Produtividade Total dos Fatores

VRS – Variable Return to Scale (Retorno Variável de Escala)

1 INTRODUÇÃO

A cada ciclo de revisão tarifária periódica das distribuidoras de energia elétrica que se inicia, abre-se uma janela de oportunidades para se discutir e avaliar as práticas realizadas no ciclo anterior e então estabelecer os devidos aperfeiçoamentos, que visam assegurar a estabilidade regulatória com tarifas equilibradas que remunerem os investidores e promovam o bem estar social,

De fato, em grande parte da literatura publicada sobre assunto, assume-se que o Regulador visa maximizar o bem-estar social dos consumidores, estabelecendo tarifas módicas para um nível de qualidade de fonecimento adequado, que, por sua vez, tem influência direta à limitação de transferência de ganhos às empresas reguladas.

Neste aspecto, o Regulador tende a incentivar as empresas a serem eficientes, buscando estabelecer mecanismos que repassem a elas parte dos ganhos oriundos de eficiência e produtividade. A outra parte dos ganhos são repassadas aos consumidores via tarifas reguladas. Isto representa, por definição, o conceito de regulação por incentivos.

Dentro deste contexto, e perante o encerramento de um ciclo tarifário (2007-2010), a Agência Nacional de Energia Elétrica (“ANEEL”) instaurou a Audiência Pública nº 040/2010, a fim de obter subsídios e informações adicionais para o estabelecimento das metodologias e critérios gerais para o terceiro ciclo de revisões tarifárias periódicas das concessionárias de distribuição de energia elétrica (“3CRTP”), que vigora entre 2011 a 2014.

Dentre as metodologias que sofreram alterações, ou até mesmo aperfeiçoamentos para este ciclo será analisada neste trabalho uma em particular, que se refere à componente de produtividade do Fator x.

Para este ciclo buscou-se estabelecer um indicador de performance capaz de captar as informações disponíveis e aferir de forma objetiva e direta a evolução da produtividade das distribuidoras em um único índice. Este índice é o de Produtividade Total dos Fatores (“PTF”), calculados pela ANEEL como uma combinação dos Índices de Malmquist e de Tornqvist.

Por meio da construção destes índices, a ANEEL estabeleceu o *benchmark* de produtividade do setor de distribuição de energia para o terceiro ciclo. Acredita-se que esta metodologia, amplamente aplicada internacionalmente em diversos setores da economia, representa um avanço com relação à metodologia anteriormente aplicada, de Fluxo de Caixa Descontado (“FCD”), baseado na projeção de receitas e despesas (*forward looking*).

Espera-se, desta forma, que este índice de produtividade consiga dar o correto sinal de investimentos prudentes para a expansão do sistema elétrico e para a manutenção adequada dos níveis de qualidade desejados na prestação do serviço de distribuição de energia, principalmente ao se considerar o momento atual de crescimento da economia brasileira, que demanda níveis cada vez maiores de consumo de energia, seja por aumento de consumo de consumidores existentes, seja pela conexão de novos consumidores.

Neste trabalho são discutidas as definições aplicadas pela ANEEL para a determinação de eficiência e produtividade das distribuidoras. É determinado um valor de produtividade média do setor de distribuição de energia, baseado no Índice Malmquist, calculado com base em funções de distâncias em relação à função fronteira, recorrendo-se, para a estimação desta, a métodos determinísticos não paramétricos (baseados em Análise de Envoltória de Dados - DEA).

No entanto, antes de se tirar conclusões sobre os resultados de produtividade alcançados por meio da aplicação do Índice de Malmquist, baseados em DEA, é fundamental a realização de análises estatísticas para se verificar o atendimento de algumas condições primordiais, tais quais: (i) se os índices são significativos,

(ii) se estão enviesados, (iii) se o viés se torna insignificante à medida que o tamanho da amostra tende ao infinito e (iv) se é possível se estimar intervalos de confiança.

Para tanto, o método de *bootstrap* (ou reamostragem de dados) aparece como uma alternativa atrativa e é, até o momento, a única maneira prática para se fazer inferências nos casos de aplicação de DEA com múltiplos insumos e produtos (The Measurement of Productivity Efficiency and Productivity Growth, Oxford University Press, Cap. 4, pag. 445).

Desta forma, os resultados obtidos serão, posteriormente, combinados com o método de *bootstrap* com o intuito de prover as devidas inferências estatísticas, com a construção de intervalos de confiança, para confirmar se os mesmos são estatisticamente significativos ou não.

Apresenta-se a seguir, resumidamente, o contexto e a motivação da pesquisa e, na sequência, a estruturação deste trabalho, com um resumo de cada capítulo.

1.1 Contexto e Motivação da Pesquisa

Diante do momento de definição pela ANEEL de nova metodologia a ser empregada no 3CRTP, este trabalho apresenta como principal objetivo a análise da metodologia do Índice de Malmquist com abordagem DEA, combinado com a técnica de *bootstrap* a fim de prover as inferências estatísticas, para se determinar os ganhos de produtividade das distribuidoras de energia elétrica do país.

1.2 Organização dos Capítulos

Neste trabalho as análises serão realizadas em três etapas distintas. A primeira etapa envolve a aplicação de DEA para se obter os índices de eficiência das distribuidoras. Na sequência será realizado o cálculo do índice de produtividade – Índice Malmquist e seus componentes que apresenta a informação da evolução da produtividade das distribuidoras ao longo do tempo. E por fim, na terceira etapa se aplica a técnica de *bootstrap* para inserir inferências estatísticas nos resultados e obter os intervalos de confiança para os índices de produtividade obtidos.

No **Capítulo 2** é contextualizado o ambiente no qual este trabalho está inserido, ou seja, o tipo de regulação econômica que determina a definição das tarifas de distribuição de energia elétrica no Brasil.

No **Capítulo 3** é descrita a técnica de DEA – método de programação não paramétrico que determina a fronteira das melhores práticas relativa aos índices de eficiência das empresas e sua aplicação para a determinação da fronteira de eficiência das distribuidoras. Nesta tarefa são utilizados os modelos estabelecidos por Charnes et al.(1978), Färe et al. (1898) e Coelli et al.(1998), aplicando-se a orientação a insumo (*input-oriented*) para a medição da eficiência, admitindo-se retornos de escalas constantes e variáveis.

No **Capítulo 4**, após o conhecimento das técnicas de DEA, são demonstrados os conceitos para a aplicação do Índice Malmquist utilizando o modelo DEA orientado a insumo.

Desde que os resultados de DEA são sensíveis à base de dados, se houver alguma variação da amostragem, a validação do DEA pode ser comprometida por

esta incerteza, e, conseqüentemente, os resultados de eficiência e produtividade obtidos.

Assim, no **Capítulo 5** é demonstrado o conceito básico da metodologia de *bootstrap*, amplamente utilizado para a análise estatística dos índices de eficiência e produtividade frente às variações da amostragem dos dados.

O **Capítulo 6**, apresenta os resultados de eficiência e produtividade das distribuidoras, combinados com a aplicação da técnica de *bootstrap*, para se determinar se os mesmos são estatisticamente significativos.

Por fim, no **Capítulo 7** são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Finalmente, o **Anexo 1** contém os dados utilizados nas análises realizadas nesta dissertação.

2 REGULAÇÃO POR INCENTIVOS – CONTEXTO BRASILEIRO

O segmento de distribuição de energia elétrica no setor elétrico brasileiro é formado por 63 concessionárias de distribuição de energia elétrica, responsáveis pelo atendimento de mais de 61 milhões de unidades consumidoras¹.

Durante muito tempo, para o setor de distribuição de energia elétrica brasileiro foi adotado o regime de regulação pelo Custo de serviço ou Taxa de Retorno, no qual os custos eram repassados diretamente às tarifas de fornecimento.

No entanto, com o objetivo de corrigir as ineficiências provocadas na regulação pelo Custo de serviço, a lei n° 8.631, de 04 de março de 1993, declarou extinto o regime de remuneração garantida.

Em 13 de fevereiro de 1995, por intermédio da Lei n° 8.987, foi instituída para as concessionárias de serviços públicos, incluindo-se a distribuição de energia elétrica, a tarifa fixada pelo preço da proposta vencedora da licitação, preservada pelas regras de revisão previstas nesta Lei, no edital de privatização e no contrato de concessão.

Assim, pela lei n° 8.987/95, o Brasil passa adotar o regime de regulação de preço teto (*price-cap*). Diferentemente do regime de custo de serviço, no regime de tarifa pelo preço, as tarifas são estabelecidas no momento da assinatura do contrato de concessão ou permissão e permanecem constantes com base em indexador previsto nos contratos por um período de tempo previamente determinado. Ao final desse período se procede a revisão tarifária. Esse intervalo no qual as tarifas permanecem fixas proporciona à concessionária ou permissionária oportunidade de aumentar seus benefícios mediante medidas de

¹ Informações obtidas no *website* da ANEEL (<http://www.aneel.gov.br/>).

redução de custos e ganhos de eficiência, dado o nível de qualidade exigido pelo Regulador na prestação do serviço.

No momento da assinatura do Contrato de Concessão ou Permissão para a distribuição de energia elétrica, a concessionária ou permissionária reconhece que as tarifas iniciais, em conjunto com os mecanismos previstos no contrato para a alteração de seus valores, são suficientes para a adequada prestação dos serviços concedidos e a manutenção do equilíbrio econômico-financeiro do Contrato².

O contrato de concessão ou permissão prevê três formas de alteração dos valores das tarifas, a fim de se manter o equilíbrio econômico-financeiro da concessão. Duas delas são ordinárias (revisão periódica e reajuste anual) e a outra extraordinária, ou seja, não aplicada normalmente.

- I. **Revisão Tarifária Periódica:** realizada em média a cada 4 anos. Nela, todos os custos são revistos e as tarifas são alteradas para mais ou para menos considerando as alterações nas estruturas de custos e de mercado, os estímulos à eficiência e à modicidade das tarifas³. Caracteriza-se como o momento onde os ganhos de produtividade que as distribuidoras tiveram a oportunidade de reter no período entre revisões são revertidos à modicidade tarifária.
- II. **Reajuste Tarifário Anual:** realizado nos anos em que não ocorre a revisão tarifária. Nele, as tarifas são atualizadas com base em

² O art. 10 da Lei 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, traz o fundamento legal para tal afirmação.

³ A metodologia de revisão tarifária aplicada no segundo ciclo de revisão tarifária (2007-2010) foi estabelecida por meio da Resolução Normativa nº 234/2006, com redação alterada pela Resolução Normativa nº 338/2008. Para o terceiro ciclo de revisão tarifária (2011-2014) a metodologia de revisão tarifária foi estabelecida por meio da Resolução Normativa nº 457/2011.

fórmula paramétrica prevista no contrato, com o objetivo de preservar o equilíbrio econômico-financeiro.

- III. **Revisão Tarifária Extraordinária:** Pode ocorrer a qualquer tempo, quando um fato extraordinário e devidamente comprovado desequilibra o contrato de concessão.

Além das cláusulas econômicas, nos contratos de concessão e permissão também são estabelecidas regras a respeito da regularidade, continuidade, atualidade dos serviços e do atendimento prestado aos consumidores. Igualmente, estão definidas penalidades para os casos em que a fiscalização da ANEEL verificar irregularidades.

O cumprimento dos contratos de concessão ou permissão e as atividades desenvolvidas pelas distribuidoras são reguladas e fiscalizadas pela ANEEL. Os contratos estabelecem ainda que as distribuidoras devam obedecer ao disposto nas resoluções publicadas pela Agência.

Considerando sempre a proteção do interesse público, os objetivos dos regulamentos da ANEEL são garantir ao consumidor, o pagamento de um valor justo e assegurar o acesso a um serviço contínuo e regular. Do mesmo modo, os regulamentos devem garantir à distribuidora o equilíbrio econômico-financeiro, para que a empresa possa oferecer serviço adequado e ter uma remuneração justa aos investimentos realizados.

2.1 Visão Geral da Regulação Econômica de Distribuição de Energia Elétrica

A tarifa de energia elétrica deve ser suficiente para cobrir todos os custos envolvidos na cadeia de produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. A cadeia não é verticalizada, ou seja, não é o mesmo agente que gera, transmite e distribui energia elétrica.

Para a distribuidora é vedado gerar ou transmitir energia elétrica⁴. Dessa forma, a tarifa deve ser o instrumento de arrecadação dos custos de geração e transmissão dos consumidores e repassá-los aos agentes de geração e transmissão, não tendo a distribuidora total gestão sobre esses custos.

De fato, a gestão sobre os custos envolvidos na cadeia de energia elétrica é a essência da separação entre o que se convencionou chamar Parcela A e Parcela B.

A Parcela A envolve custos relacionados à aquisição de energia elétrica para atendimento aos clientes, uso dos sistemas de transmissão e encargos setoriais. Em geral, por não estarem diretamente relacionados à atividade fim das distribuidoras, esses custos são considerados não gerenciáveis e as variações de preços são repassadas diretamente a cada processo tarifário (seja reajuste ou revisão) às tarifas dos consumidores finais.

A Parcela B compreende o valor remanescente da receita envolvendo, principalmente, as despesas com distribuição de energia elétrica. São custos

⁴ O art. 4 da Lei 9.074/1995, com redação alterada pela Lei 10.848/2004 traz tal vedação. As únicas exceções são o atendimento aos sistemas isolados e as distribuidoras com mercado próprio inferior a 500 GWh/ano, desde que a totalidade da energia gerada seja para atendimento de seu mercado.

inerentes da atividade de distribuição, que estão sujeitos ao controle e influência das práticas gerenciais adotadas pela concessionária e, por definição, são repassados por meio de valores definidos pela ANEEL. Tratam-se, principalmente, dos custos operacionais e dos investimentos feitos pela concessionária para atendimento adequado de seus clientes. A composição de cada parcela pode ser vista no quadro a seguir.

Tabela 1 – Composição da receita de uma distribuidora de energia elétrica

COMPOSIÇÃO DA RECEITA REQUERIDA	
PARCELA A (custos não-gerenciáveis)	PARCELA B (custos gerenciáveis)
Compra de Energia Elétrica para Revenda	Custos Operacionais para Distribuição de Energia
Custo com Transporte de Energia	Investimentos feitos no sistema de Distribuição
Encargos Setoriais	

A forma de considerar as variações dos itens que compõem as Parcelas A e B nos reajustes e revisões tarifárias é diferenciada. Para a Parcela A, como são itens de custo sobre os quais a distribuidora não tem completa gestão, estes são repassados às tarifas tanto das revisões tarifárias quanto nos reajustes anuais.

Para a Parcela B, o tratamento dado nas revisões tarifárias e nos reajustes anuais é diferenciado. Na forma como é definida a Parcela B nas revisões tarifárias e em sua fórmula de correção nos reajustes anuais reside grande parte dos incentivos econômicos para que as concessionárias se tornem mais eficientes e produtivas.

As atuais regras jurídicas e econômicas relativas ao regime tarifário dos contratos de concessão e permissão do serviço público de distribuição de energia elétrica no Brasil constituem uma vertente do regime de regulação por incentivos. Sua finalidade precípua é o aumento da eficiência e da qualidade na prestação do serviço, atendendo ao princípio da modicidade tarifária.

Para se atingir tal finalidade, a Parcela B é reposicionada apenas nas revisões

tarifárias periódicas. Nesse momento são utilizadas metodologias que buscam definir o valor da Parcela B preservando as margens das distribuidoras mais eficientes e impedindo que as mais ineficientes repassem tais ineficiências às tarifas. Uma vez que se defina o valor da Parcela B na revisão tarifária, nos reajustes seguintes a mesma será apenas corrigida (ou reajustada), mantendo o nível definido na revisão. Dessa forma, distribuidoras que reduzam seus custos e que, portanto, tenham custos reais inferiores aos repassados às tarifas, retêm essa margem até a próxima revisão periódica. Essa é a essência da regulação por incentivos.

A Figura 1 a seguir ilustra o efeito do regime de preços máximos (regulação por incentivos) sobre as tarifas. Para simplificar o entendimento, supõe-se que as variações do índice que reajusta anualmente a Parcela B e dos custos da Parcela A sejam iguais a zero ao longo do período tarifário. A tarifa (ou “preço máximo”), inicialmente fixada em T_1 (primeira revisão tarifária) permanece com seu valor fixo (em termos reais) no período tarifário, ou seja, até a próxima revisão tarifária periódica.

Isso significa que a Distribuidora tem a oportunidade de reduzir seus custos (operacionais e de capital) – o que está expresso pela área azul da Figura 1 – apropriar-se desta redução de custos e, assim, aumentar sua remuneração ao longo desse período.

Se a Distribuidora for eficiente, poderá se apropriar do aumento da remuneração resultante de sua gestão ao longo do período. Por outro lado, às concessionárias que se tornam mais ineficientes é vedado o repasse tarifário das variações de seus custos. Dessa forma as concessionárias têm grande incentivo a se tornarem mais eficientes.

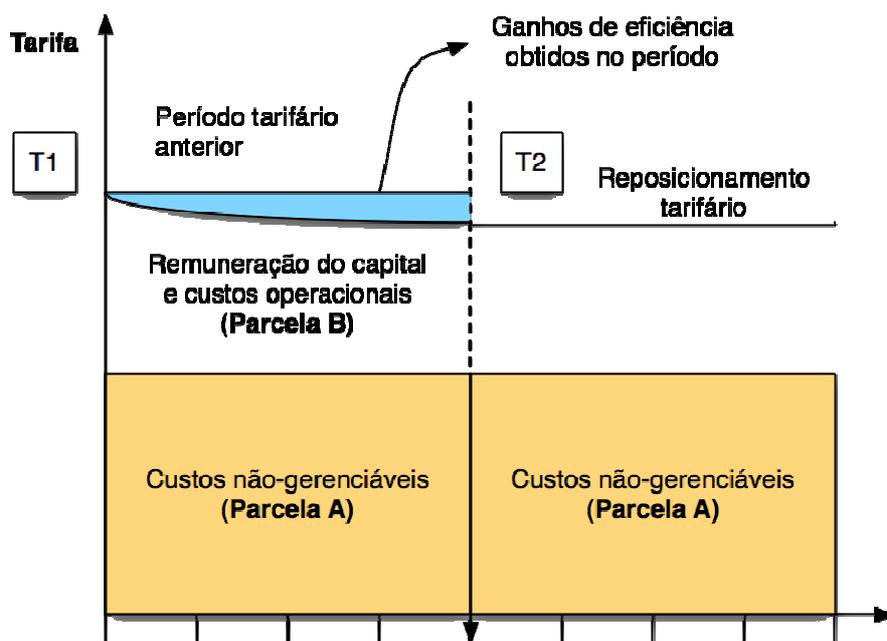


Figura 1 – Regime de Regulação por Preços Máximos (*Price-Cap*)

No momento da próxima revisão tarifária, quando passa a vigorar a tarifa T_2 da Figura 1, os ganhos de eficiência são revertidos à modicidade tarifária. Dessa forma o modelo de regulação por incentivos visa atingir um compromisso entre a apropriação dos ganhos de eficiência pelas concessionárias no período entre revisões periódicas e sua reversão à modicidade tarifária no momento da revisão periódica.

A Tabela 2 a seguir sintetiza a forma de definição e correção dos itens que compõem as Parcelas A e B nos reajustes e revisões tarifárias.

Tabela 2 - Definição das Parcelas A e B nos processos de revisão e reajuste tarifário

	PARCELA A	PARCELA B
REVISÃO TARIFÁRIA PERIÓDICA	Redefinida	Redefinida
REAJUSTE TARIFÁRIO ANUAL	Redefinida	Apenas corrigida ou reajustada

2.2 Revisão Tarifária Periódica

A revisão tarifária periódica é realizada em duas etapas: o reposicionamento tarifário e o cálculo do Fator X. O reposicionamento tarifário consiste basicamente em comparar a receita que a distribuidora teria nos doze meses subsequentes à data da revisão, a chamada receita verificada, com a receita que efetivamente a distribuidora necessita ter para estar em equilíbrio econômico-financeiro, o que se convencionou chamar de receita requerida, conforme fórmula a seguir:

$$RT = \frac{\text{Receita Requerida} - \text{Outras Receitas}}{\text{Receita Verificada}} \quad (2-1)$$

A receita requerida é construída na revisão tarifária e consiste em dimensionar as Parcelas A e B necessárias para se prestar o serviço de distribuição de forma adequada, levando-se em consideração os estímulos à eficiência e à modicidade tarifária. Da receita requerida ainda são descontadas as “outras receitas” que são receitas que as distribuidoras auferem com compartilhamento de infra-estrutura como, por exemplo, cobrança pela utilização de rede de distribuição para se prestar os serviços de *internet* e televisão a cabo.

Já o Fator X tem por objetivo compartilhar com os consumidores os ganhos de produtividade da concessionária estimados para o próximo período tarifário.

Conforme exposto anteriormente, o contrato de concessão estabelece que uma vez determinado o valor da Parcela B, considerando custos operacionais eficientes e uma adequada remuneração dos investimentos prudentes, este valor será reajustado anualmente pela aplicação do índice IGP-M – X.

O Fator X é um parâmetro que tem por objetivo garantir que o equilíbrio estabelecido no momento da revisão tarifária se mantenha ao longo do período

tarifário. O fluxo de receitas e despesas não cresce no mesmo ritmo, e dessa forma cabe ao Fator X balancear a relação entre os crescimentos dessas duas variáveis.

Quando se observa que as receitas crescem mais do que as despesas, então o Fator X deve ser positivo (reduz a correção da Parcela B nos reajustes), caso contrário, se as despesas crescem mais do que as receitas, então para se preservar o equilíbrio econômico e financeiro definido na revisão, é necessário se corrigir a Parcela B pela inflação e algo mais, nesse caso o Fator X é negativo. Isso requer que sejam considerados no Fator X os efeitos sobre a produtividade derivados da mudança na escala do negócio por incremento da demanda da área servida (tanto por maior consumo dos clientes existentes como pela incorporação de novos usuários).

O regulador captura a maior parte dos possíveis ganhos de eficiência já no processo de revisão (fazendo $p_0 = CMe$, sendo CMe o custo médio eficiente⁵). Devido à característica de monopólio natural forte (custos médios decrescentes), que possui o negócio de distribuição, e, considerando o crescimento do mercado ao longo do intervalo regulatório (passando de q_0 para q_1), a distribuidora obterá ganhos de escala, sendo o Fator X usualmente positivo, como ilustra a Figura 2:

⁵ Em outras palavras, estabelecer tarifas que sejam iguais ao custo médio eficiente é definir o nível tarifário considerando os investimentos prudentes, remunerados a uma taxa adequada, e os custos operacionais eficientes.

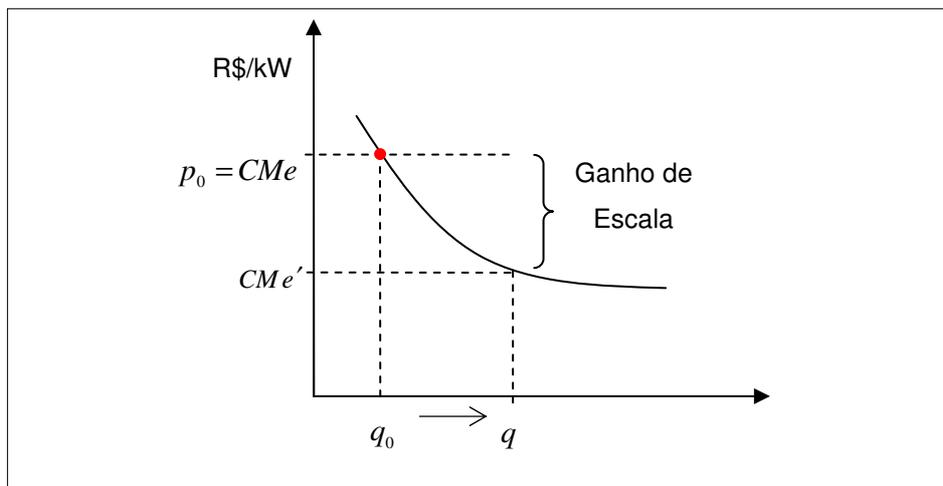


Figura 2 – Ganho de Escala

A abordagem adotada para o cálculo do Fator X no Brasil até o segundo ciclo tarifário (2007-2010) baseava-se na metodologia de Fluxo de Caixa Descontado (FCD). No entanto, para a 3CRTP será aplicada a metodologia de Produtividade Total dos Fatores (PTF), conforme Resolução Normativa nº 457/2011.

Através da aplicação da metodologia do FCD determinava-se a produtividade de cada Distribuidora, baseada no fluxo de caixa descontado da empresa regulada com base em projeções de suas variáveis de receitas e despesas, de forma semelhante ao realizado para a definição da taxa de retorno.

Trata-se de uma abordagem do tipo *forward looking*, uma vez que são realizadas projeções sobre a evolução de demanda, do mercado, dos investimentos e do potencial de eficiência na gestão dos custos da empresa regulada.

A aplicação desta metodologia sobre o fluxo de caixa da empresa permitia determinar o nível de receita capaz de permitir sua operação de acordo com seus custos totais necessários à prestação do serviço de forma eficiente. Descontando este fluxo a uma taxa igual ao custo de capital da empresa (*WACC*), assegurava-se uma rentabilidade sobre seus ativos e investimentos equivalente ao custo de oportunidade de seu capital.

O resultado era a determinação do componente produtividade (X_e) do Fator X, que tinha por objetivo compartilhar os ganhos estimados de produtividade com os consumidores, e ao mesmo tempo, garantir o equilíbrio econômico-financeiro da concessionária definido no processo de revisão tarifária periódica.

Para o 3CRTP, a ANEEL resolveu inovar o método de determinação da produtividade das Distribuidoras, seguindo uma tendência de reguladores de distribuição de energia de outros países, ao aplicar uma abordagem baseada na Produtividade Total dos Fatores, conforme já mencionado.

Esta metodologia tem como um dos objetivos a simplificação, criando uma metodologia mais homogênea, clara e previsível de determinação do ganho de produtividade esperado de acordo com o crescimento de mercado.

3 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA POR MEIO DA APLICAÇÃO DE ANÁLISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS - DEA

A técnica de análise de DEA, baseada em programação linear, permite lidar com múltiplas medidas (insumos e produtos) em um único modelo integrado para a determinação da eficiência de um processo.

Os insumos são aqueles fatores que sempre se busca minimizar, como custos, materiais, matéria prima, etc. E, por outro lado, os produtos são aqueles que buscam a maximização, como receitas, lucros, peças produzidas (em um processo industrial), etc.

Na abordagem DEA, quaisquer processos, operações de negócios ou empresas em avaliação são denominadas de *Decision Making Units* (“DMUs”), que podem ser hospitais, indústrias, escolas, fazendas, bancos, universidades, ou seja, qualquer entidade que transforma múltiplos insumos em múltiplos produtos.

Como premissa assume-se, nas análises, que todas as DMUs em comparação operam de forma homogênea. Ou seja, elas utilizam os mesmos insumos e produzem os mesmos produtos (cada qual consumindo e produzindo suas respectivas quantidades).

A eficiência de cada DMU é dada como a razão entre a soma ponderada dos produtos e a soma ponderada dos insumos, ajustados para que a eficiência seja um número entre 0 e 1. Quanto menos insumos consumidos e mais produtos produzidos, mais eficiente será a DMU. Veja que esta medida trata-se de uma definição típica de produtividade.

A principal característica da abordagem DEA é que os pesos não são conhecidos previamente e são calculados de forma a serem os mais favoráveis para cada

DMU. Esta característica introduz o elemento de objetividade necessário na análise de eficiência, que não existe quando estes pesos são estabelecidos de maneira arbitrária.

Aquelas DMUs que atingem um valor de eficiência de 1 formam uma fronteira de eficiência que “envelopa” todas as outras DMUs, conforme pode-se verificar pela Figura 3. A identificação desta fronteira do DEA é realizada, portanto, quando as DMUs com as melhores performances são identificadas.

Ao se comparar cada DMU com a Fronteira de Eficiência, tem-se: (i) um índice de eficiência para cada DMU, (ii) um conjunto de referência de eficiência e (iii) um objetivo para cada DMU ineficiente, ou seja, informações sobre quanto de insumos deve reduzir ou de quanto de produto deve aumentar para se tornar eficiente.

Portanto, o DEA pode ser usado como uma ferramenta para melhorar a produtividade e performance via a projeção das DMUs à fronteira de eficiência.

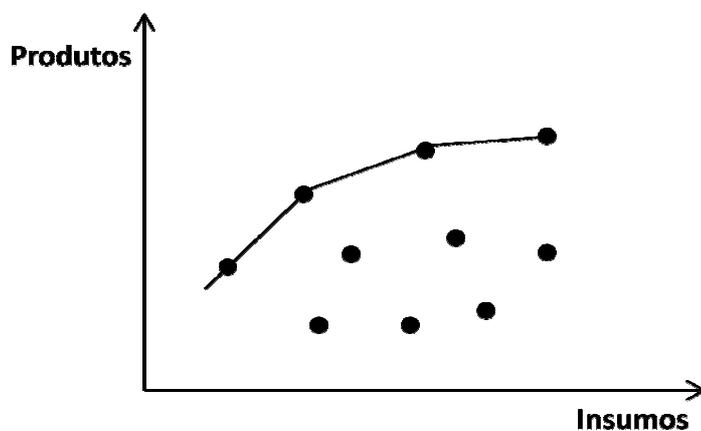


Figura 3 - Fronteira de Eficiência das DMUs calculada através de DEA

Existem duas orientações fundamentais para mover as DMUs ineficientes para a Fronteira de Eficiência: orientação a insumo e orientação a produto.

Na orientação a insumo o interesse fica na redução dos insumos dado um nível de produção. Enquanto que na orientação a produto o interesse é exatamente o

oposto, ou seja, deseja-se maximizar a produção dada uma quantidade de insumos no processo.

Para melhor visualizar este conceito, tem-se o exemplo ilustrado na Figura 4 com apenas um insumo e um produto e 2 DMUs em avaliação. A DMU B encontra-se na Fronteira de Eficiência enquanto que a DMU A é ineficiente.

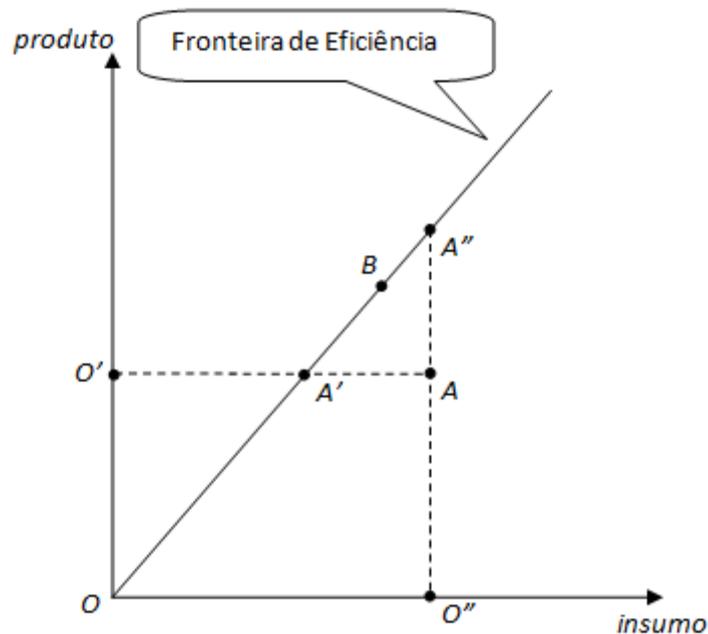


Figura 4 – Exemplo de Fronteira de Eficiência

De forma a alcançar a eficiência, a DMU A deve reduzir seus insumos mantendo a mesma quantidade produzida de produtos, abordando uma orientação a insumo. Ou então, em uma abordagem orientada a produto, aumentar sua produção mantendo o mesmo nível de insumos, conforme já discutido acima.

Analisando-se do ponto de vista da orientação a insumo, a DMU A deve alcançar o ponto A' movendo-se através da linha O'A. Assim, uma vez que (x_A, y_A) e (x_B, y_B) correspondem respectivamente às coordenadas da DMU A e B e $(0, y_A)$ corresponde à ordenada do ponto O', tem-se que:

$$\begin{cases} y_{A'} = y_A \\ y_{A'} = \frac{y_B}{x_B} x_{A'} \end{cases} \quad (3-1)$$

Portanto, a coordenada do ponto A' é dada por:

$$\begin{cases} y_{A'} = y_A \\ x_{A'} = \frac{x_B}{y_B} y_A \end{cases} \quad (3-2)$$

De forma a calcular a eficiência de A deve-se obter o montante relativo para o qual devem ser reduzidos os insumos sem que a quantidade de produtos seja impactada. Este valor relativo é dado por:

$$\theta_A = \frac{O'A'}{O'A} \quad (3-3)$$

Utilizando-se a coordenada da DMU A e a equação (3-1), tem-se:

$$\theta_A = \frac{\frac{x_B}{y_B} y_A}{x_A} = \frac{y_A}{x_A} \cdot \frac{x_B}{y_B} \quad (3-4)$$

Partindo do conceito de produtividade, que é a razão entre produtos e insumos, tem-se:

$$\theta_A = \frac{\text{Produtividade}_A}{\text{Produtividade}_B} \quad (3-5)$$

Assim, de forma generalizada tem-se:

$$\theta_i = \frac{\text{Produtividade}_i}{\text{Produtividade}_{\text{Eficiente}}} \quad (3-6)$$

Na equação (3-6), θ_i é o índice de eficiência da i -ésima DMU e é dado pela proporção entre a DMU ineficiente analisada e a fronteira de eficiência.

Na análise orientada a insumo, a eficiência de uma DMU está sempre entre zero e um ($0 < \theta_i \leq 1$). Quando uma DMU tem um índice de eficiência igual a um ($\theta_i = 1$), a mesma encontra-se na fronteira de eficiência, e é considerada eficiente.

Por outro lado, quando uma DMU se encontra fora da fronteira, tem-se que $\theta_i < 1$, e, neste caso, se indica que para a mesma quantidade de produtos a DMU deve reduzir a quantidade de insumos praticada a fim de se tornar mais eficiente.

De maneira similar, realizam-se as mesmas análises do ponto de vista de orientação ao produto. Neste caso, a DMU A deveria alcançar o ponto A'' movendo-se através da linha O''A''. Desta forma, tem-se:

$$\begin{cases} x_{A''} = x_A \\ x_{A''} = \frac{x_B}{y_B} y_{A''} \end{cases} \quad (3-7)$$

Portanto, a coordenada do ponto A'' é dada por:

$$\begin{cases} y_{A''} = \frac{y_B}{x_B} x_A \\ x_{A''} = x_A \end{cases} \quad (3-8)$$

De forma a calcular a eficiência de A, deve-se obter o montante relativo para o qual deve ser incrementado o produto mantendo-se o mesmo nível de insumo. Este valor relativo é dado por:

$$\phi_A = \frac{O''A''}{O''A} \quad (3-9)$$

Utilizando-se a coordenada da DMU A e a equação (3-8), tem-se:

$$\phi_A = \frac{\frac{y_B}{x_B} x_A}{y_A} = \frac{x_A}{y_A} \cdot \frac{y_B}{x_B} \quad (3-10)$$

E de forma similar ao realizado na análise orientada a insumo, na análise orientada a produto, tem-se:

$$\phi_i = \frac{\text{Produtividade}_{\text{Eficiente}}}{\text{Produtividade}_i} \quad (3-11)$$

Na equação (10), ϕ_i é o índice de eficiência da *i-ésima* DMU, e é dada pela proporção entre a fronteira de eficiência e a DMU ineficiente analisada.

Na análise orientada a produto, o índice de eficiência da DMU é sempre maior ou igual a um ($\phi_i \geq 1$). Quando uma DMU tem um índice de eficiência igual a um ($\phi_i = 1$) ela se encontra na fronteira de eficiência e é, portanto, eficiente. Caso contrário, ela é ineficiente.

O caso particular discutido nesta seção refere-se ao modelo de Retorno Constante de Escala (CRS, na sigla em inglês), no qual uma linha define a fronteira de produtividade. Neste caso particular $\theta_i = 1/\phi_i$. No entanto, se a escala não for constante, esta proporção não é mantida. Estes casos são discutidos ao longo deste capítulo.

3.1 Modelo Multiplicador DEA

O índice de produtividade considerando-se n DMUs, m insumos e s produtos pode ser formulada por meio da equação abaixo:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^s u_i y_{ij}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}}, \text{ for } j = 1, 2, \dots, n \quad (3-12)$$

Onde x_{ij} e y_{ij} são respectivamente os i -ésimos insumos e produtos da j -ésima DMU. As variáveis u_i e v_i são os preços dos produtos e insumos, respectivamente.

Se os preços são conhecidos, a equação (3-12) é facilmente calculada e obtém-se a produtividade e a eficiência das DMUs. No entanto, na realidade, estes preços ou são muito difíceis de calcular ou simplesmente não existem.

Desta forma, uma aproximação alternativa deve ser utilizada para se determinar este índice de produtividade. De fato, o que se busca é a maximização de P sob um conjunto de pesos. Portanto, este problema deve ser resolvido através da aplicação da teoria de otimização onde as variáveis de controle são dadas por um conjunto de pesos que maximizem a equação (3-12), considerando o desempenho de todas as DMUs (CHARNES et al, 1978).

Para uma unidade particular, DMU_0 maximizaria sua produtividade resolvendo o seguinte problema:

$$\text{maximizar } \frac{\sum_{i=1}^s u_i y_{i0}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i0}} \quad (3-13)$$

Sujeito a:

$$\frac{\sum_{i=1}^s u_i y_{ij}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{ij}} \leq 1, \text{ for } j = 1, 2, \dots, n$$

$$u_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, s \text{ and } v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

A primeira restrição da equação (3-13) limita a função objetivo a 1, e depois traduz a produtividade definida na equação (3-12) em um índice de eficiência. Ainda, valores não negativos de u_i e v_i asseguram que o índice de eficiência nunca é menor que zero. A solução da equação (3-13) define os pesos u_i e v_i (também conhecidos como preços sombras) que devem ser aplicados a todas as DMUs e também maximiza a eficiência da DMU₀ analisada. De forma a se obter os índices de eficiência de todas as DMUs, a equação (3-13) deve ser rodada n vezes, uma para cada DMU.

O problema de otimização dada pela equação (3-13), que é um modelo não linear, pode ser linearizado considerando a seguinte transformação:

$$t = \left(\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} \right)^{-1}, v_i = t v_i, \mu_i = t u_i \quad (3-14)$$

Aplicando-se (3-14) em (3-13), tem-se:

$$\text{maximizar } z = \sum_{i=1}^s \mu_i y_{i0}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^s \mu_i y_{ij} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \text{ for } j = 1, 2, \dots, n \quad (3-15)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1$$

$$\mu_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, s \text{ and } v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

A equação (3-15) é um modelo linear conhecido como Modelo Multiplicador DEA. As variáveis de controle μ_i e v_i podem ser obtidas utilizando-se de técnicas de programação linear. O modelo, em questão, tenta minimizar o conjunto de insumos produzindo o mesmo montante de produtos. O que define, portanto, o modelo DEA orientado a insumo.

A primeira restrição refere-se ao ajuste de produção de todas as DMUs. A segunda restrição assegura que a função objetivo nunca é maior que 1. Novamente, valores não negativos de μ_i e v_i garantem que o índice de eficiência nunca seja menor que zero.

O modelo da equação (3-15) define o modelo DEA de Retorno Constante de Escala, pelo qual se assume que ao se aumentar os insumos por um fator k, os produtos serão incrementados pelo mesmo fator k.

Por outro lado, se o interesse da análise estiver em se alcançar a eficiência pela alteração de produtos ao invés de insumos, então se aplica a equação abaixo, com um modelo DEA orientado a produto.

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^m v_i x_{io}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^s \mu_i y_{ij} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \text{ for } j = 1, 2, \dots, n \quad (3-16)$$

$$\sum_{i=1}^s \mu_i y_{io} = 1$$

$$\mu_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, s \text{ and } v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

O objetivo deste modelo é maximizar a produção, mantida a quantidade de insumos.

3.2 Modelo DEA de Envelopamento

O Modelo Multiplicador DEA ora apresentado é baseado na seleção de um conjunto de pesos que maximiza o índice de eficiência de uma DMU. No entanto, o modelo linear apresentado nas equações (3-15) e (3-16) não resultam no índice de eficiência diretamente.

Uma aproximação alternativa a este modelo é usar o tão conhecido modelo dual , referido como Modelo DEA de Envelopamento. Este modelo é apresentado a seguir.

Primeiramente, considere o DEA orientado a insumo dado pela equação (3-15). Pode-se reescrever o modelo aplicando uma aproximação matricial, como:

$$\text{maximize } z = \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{w}$$

Sujeito a:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{w} \leq \mathbf{b} \tag{3-17}$$

$$\mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{w} \leq \mathbf{b}_{eq}$$

$$\mathbf{w} \geq 0$$

onde:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{c}^T &= [y_1, y_2, \dots, y_s, 0_{1 \times m}] & \mathbf{w}^T &= [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s, u_1, u_2, \dots, u_m] \\
 \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1s}, x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1m}, \\ \vdots \\ y_{n1}, y_{n2}, \dots, y_{ns}, x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nm}, \end{bmatrix} & \mathbf{b}^T &= [0_{1 \times n}] \\
 \mathbf{A}_{eq} &= [0_{1 \times s}, x_{o1}, x_{o2}, \dots, x_{om}] & \mathbf{b}_{eq}^T &= [1]
 \end{aligned}$$

Considerando a teoria de programação linear, o modelo dual para (3-17) é dado por:

$$\text{minimizar } z = \mathbf{b}_{eq}^T \cdot \theta_o + \mathbf{b}^T \cdot \lambda_o$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{eq}^T \cdot \theta_o + \mathbf{A}^T \cdot \lambda_o &\geq c & (3-18) \\
 \lambda_o &\geq 0
 \end{aligned}$$

Abrangendo a equação (3-18), tem-se:

$$\text{minimizar } z = \theta_o$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ij} &\leq \theta_o x_{io} & (3-19) \\
 \sum_{i=1}^n \lambda_i y_{ij} &\geq y_{io} \\
 \lambda_i &\geq 0
 \end{aligned}$$

A equação (3-19) define o Modelo de Envolvimento DEA orientado a insumo, por meio da qual se obtém diretamente o índice de eficiência da DMU₀ analisada.

De maneira similar, a equação (3-20) define o Modelo de Envelopamento DEA orientada a produto, e ϕ_o dá diretamente o índice de eficiência da DMU_o analisada.

$$\text{maximizar } z = \phi_o$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ij} \leq x_{io} \quad (3-20)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i y_{ij} \geq \phi_o y_{io}$$

$$\lambda_i \geq 0$$

No próximo item é introduzido o conceito de Retorno Variável de Escala (“VRS”, na sigla em inglês).

3.3 Modelos DEA com Retorno Variável de Escala

Nos itens anteriores foram apresentados modelos DEA com retornos constantes de escala, que considera que se um insumo é incrementado por um fator k , então os produtos terão um incremento na mesma proporção k . Este conceito pode ser representado por uma linha reta que delimita a fronteira de produtividade, como ilustrado na Figura 5.

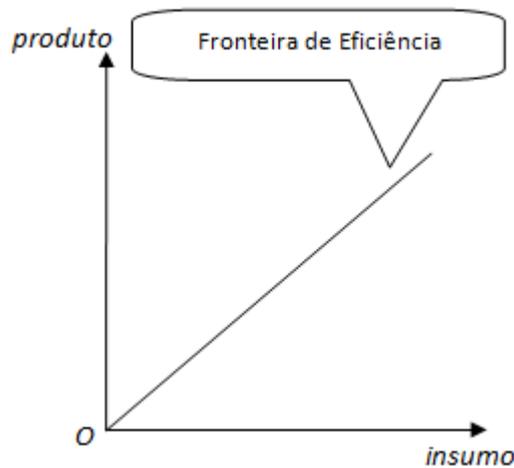


Figura 5 - Retorno Constante de Escala

Entretanto, retornos de escala geralmente não são constantes. Pode-se ter Retorno Crescente de Escala (“IRS”, na sigla em inglês) ou Retorno Decrescente de Escala (“DRS”, também na sigla em inglês). Em IRS, se os insumos são incrementados por um fator k , os produtos são incrementados por um fator maior que k .

Por outro lado, em DRS se os insumos forem incrementados por um fator k , os produtos serão por um fator menor que k . Um mix de IRS e DRS também pode ser observado na fronteira de produtividade, caracterizando um retorno variável de escala. A Figura 6 ilustra cada um desses três casos.

Para estes casos, Banker et. al. (1984), propôs um modelo que permite que a máxima produtividade varie como uma função dos insumos. Faz-se necessário, portanto, uma pequena modificação nas equações (3-19) e (3-20). Considerando-se a restrição $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ no modelo CRS, tem-se o modelo VRS apresentado abaixo.

$$\text{minimizar } z = \theta_o \tag{3-21}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ij} \leq \theta_o x_{io}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i y_{ij} \geq y_{io}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

$$\lambda_i \geq 0$$

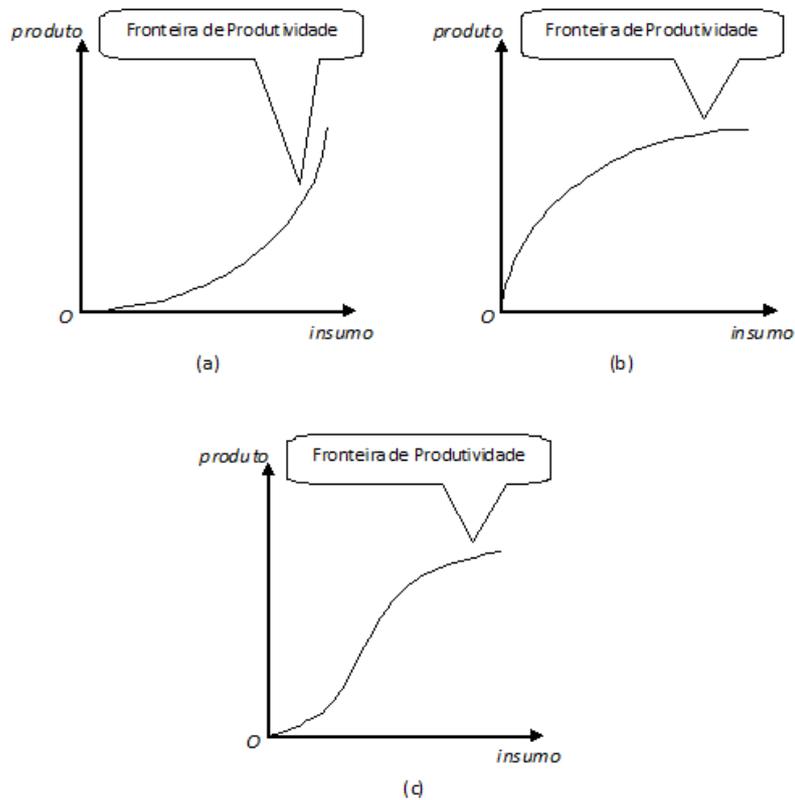


Figura 6 - Retornos de escala não-constantess para a Fronteira de Produtividade: (a) retorno crescente de escala; (b) retorno decrescente de escala; e (c) retorno variável de escala.

A equação (3-21) define o Modelo DEA de Envolvimento orientado a insumo com retorno variável de escala. O modelo dual, ou seja, o Modelo Multiplicador com retorno variável de escala é dado pela equação (3-22).

$$\text{maximizar } z = \sum_{i=1}^s \mu_i y_{io} + \mu_o$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^s \mu_i y_{ij} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + \mu_o \leq 0, \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \quad (3-22)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{io} = 1$$

$$\mu_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, s \text{ e } v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

Os modelos dados pelas equações (3-21) e (3-22) serão agora analisados graficamente.

Considere as cinco DMUs (*A*, *B*, *C*, *D* e *E*) ilustradas na Figura 7. Tem-se que os segmentos de linha *AB*, *BC* e *CD* definem a fronteira de produtividade que envelopa a DMU *E*, que é ineficiente.

Observe ainda que a intersecção no eixo do produto é definido como o μ_o do Modelo Multiplicador DEA com retorno variável de escala, definido pela equação (3-22). Valores de $\mu_o < 0$, $\mu_o = 0$ and $\mu_o > 0$ correspondem, respectivamente, a IRS, CRS e DRS.

O modelo VRS é muito útil na construção e análise da fronteira de produtividade, desde que nenhuma relação *à priori* entre os insumos e produtos é necessária.

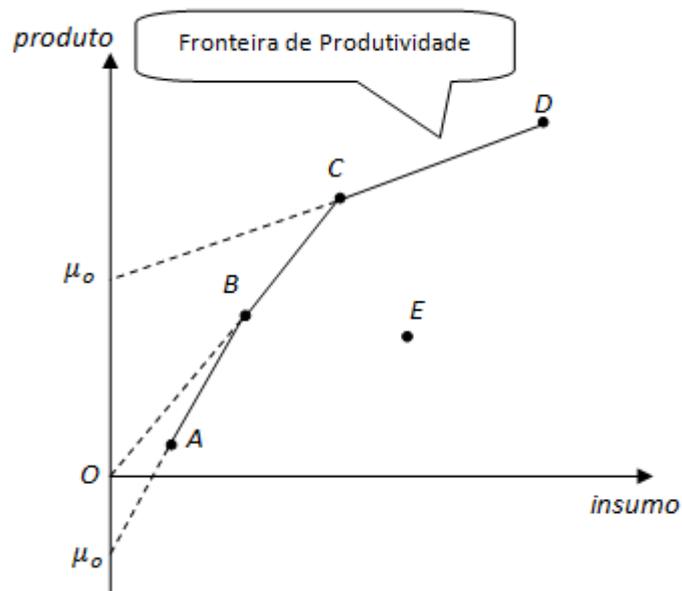


Figura 7 - Retorno Variável de Escala

Similarmente, o modelo VRS orientado a produto é dado pelas equações (3-23) e (3-24). Nestes casos, IRS, CRS e DRS são definidos por $v_o < 0$, $v_o = 0$, $v_o > 0$, respectivamente.

$$\text{maximizar } z = \phi_o$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_{ij} \leq x_{io} \tag{3-23}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i y_{ij} \geq \phi_o y_{io}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

$$\lambda_i \geq 0$$

$$\text{minimizar } z = \sum_{i=1}^m v_i x_{io} + v_o$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^s \mu_i y_{ij} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} + v_o \leq 0, \text{ para } j = 1, 2, \dots, n \quad (3-24)$$

$$\sum_{i=1}^s \mu_i y_{io} = 1$$

$$\mu_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, s \text{ e } v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m$$

Quando o interesse for por analisar DMUs com retornos de escalas não-crescentes (“NIRS”, na sigla em inglês) ou com retornos de escalas não-decrescente (“NDRS”, na sigla em inglês), a restrição $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ deve ser substituída por $\sum_{i=1}^n \lambda_i \leq 1$ ou $\sum_{i=1}^n \lambda_i \geq 1$, respectivamente nas equações (3-21) e (3-23).

No caso de uso do Modelo Multiplicador DEA definido pelas equações (3-22) e (3-24), restringindo μ_o e v_o a valores não-negativos definem NIRS, enquanto que restringindo μ_o e v_o a valores não-positivos definem NDRS.

3.4 Exemplos de aplicação

São aplicados neste item os conceitos fundamentais desenvolvidos ao longo deste capítulo, que servirá como base para a determinação da eficiência das distribuidoras, proposta deste trabalho.

Para fins de aplicação dos conceitos demonstrados neste capítulo, são explorados 3 casos simplificados, conforme definidos na Tabela 3.

Buscou-se considerar variações, caso a caso, da quantidade de DMUs e também das quantidades de produtos a serem considerados. Além disso, no Caso 3 é analisada uma abordagem orientada a produto.

Em todos os três casos exemplos analisados, é considerado como insumo o custo operacional eficiente de cada distribuidora (“Opex”, na sigla em inglês) e como produtos o mercado total (ME), a extensão de rede (ER) e a quantidade de consumidores (NC) de cada distribuidora.

Tabela 3 – Casos exemplos

Casos	DMUs	Insumo	Produto	Orientação
1	7	Opex	ME	Insumo
2	21	Opex	ME	Insumo
3	21	Opex	ER NC	Produto

O caso 1 considera apenas dados de sete distribuidoras referentes a 2009, apresentados na Tabela 4. Neste caso, é considerado um insumo (Opex) e um produto (ME).

Tabela 4 – Dados parciais das Distribuidoras (Caso 1)

DISTRIBUIDORAS	ANO	OPEX [R\$]	ME [MWh]
CELESC	2009	721.455.274	18.105.811
CELG	2009	691.472.253	9.344.291
CEMIG	2009	1.682.334.644	37.476.802
COPEL	2009	1.018.866.491	23.525.040
CPFL – Paulista	2009	497.290.782	25.267.579
ELEKTRO	2009	414.602.018	13.398.558
ELETROPAULO	2009	1.249.143.613	39.922.710

Para a construção da fronteira de eficiência (função de produtividade), aplicam-se então os modelos CRS e VRS, cujos resultados são apresentados na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Resultados DEA CRS e DRS (Caso 1)

Distribuidora	θ_o (CRS)	θ_o (VRS)
CELESC	0,494	0,620
CELG	0,266	0,600
CEMIG	0,438	0,668
COPEL	0,454	0,476
CPFL- Paulista	1,000	1,000
ELEKTRO	0,636	1,000
ELETROPAULO	0,629	1,000

Verifica-se que pelo modelo DEA VRS as DMUs ELEKTRO e ELETROPAULO junto com a CPFL – Paulista definem a fronteira de eficiência. Por outro lado, no modelo DEA CRS somente a CPFL – Paulista define a fronteira de eficiência, desde que seu $\theta_o = 1,000$.

Considere agora o Caso 2, onde o regulador não está interessado apenas em analisar a eficiência entre as distribuidoras entre si em um determinado ano, mas também entre elas ao longo do tempo.

Para este caso são utilizadas as mesmas sete distribuidoras, porém ao longo dos anos de 2007, 2008 e 2009, totalizando, desta maneira, 21 DMUs em análise. Os dados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados parciais das Distribuidoras (Caso 2)

Distribuidora	Ano	Opex	ME
CELESC	2007	756.184.574	17.130.667
CELG	2007	736.354.227	8.626.988
CEMIG	2007	1.774.784.778	38.125.556
COPEL	2007	856.222.030	22.069.892
CPFL – Paulista	2007	500.193.755	24.419.599
ELEKTRO	2007	424.867.305	12.918.861
ELETROPAULO	2007	1.139.787.894	38.845.838
CELESC	2008	744.858.775	17.797.189
CELG	2008	655.696.683	9.013.858
CEMIG	2008	1.699.703.653	39.453.499
COPEL	2008	878.914.611	23.266.889

CPFL – Paulista	2008	486.380.023	25.287.667
ELEKTRO	2008	411.222.070	13.455.778
ELETROPAULO	2008	1.044.552.699	40.259.597
CELESC	2009	721.455.274	18.105.811
CELG	2009	691.472.253	9.344.291
CEMIG	2009	1.682.334.644	37.476.802
COPEL	2009	1.018.866.491	23.525.040
CPFL – Paulista	2009	497.290.782	25.267.579
ELEKTRO	2009	414.602.018	13.398.558
ELETROPAULO	2009	1.249.143.613	39.922.710

Os resultados desta análise estão resumidos na Tabela 7. Pode-se verificar pela referida tabela que a CPFL – Paulista foi produtivamente eficiente no ano de 2008, estabelecendo o *benchmark* no modelo CRS. E no modelo VRS, a fronteira foi estabelecida CPFL – Paulista, ELETROPAULO e ELEKTRO, todas do ano de 2008.

Tabela 7 - Resultados DEA CRS e VRS (Caso 2)

Distribuidora	Ano	θ_o (CRS)	θ_o (VRS)
CELESC	2007	0,436	0,575
CELG	2007	0,225	0,558
CEMIG	2007	0,413	0,544
COPEL	2007	0,496	0,544
CPFL - Paulista	2007	0,939	0,961
ELEKTRO	2007	0,585	0,968
ELETROPAULO	2007	0,656	0,870
CELESC	2008	0,460	0,589
CELG	2008	0,264	0,627
CEMIG	2008	0,446	0,597
COPEL	2008	0,509	0,539
CPFL - Paulista	2008	1,000	1,000
ELEKTRO	2008	0,629	1,000
ELETROPAULO	2008	0,741	1,000
CELESC	2009	0,483	0,611
CELG	2009	0,260	0,595
CEMIG	2009	0,428	0,559

COPEL	2009	0,444	0,466
CPFL - Paulista	2009	0,977	0,978
ELEKTRO	2009	0,622	0,992
ELETROPAULO	2009	0,615	0,826

Esta análise descrita no Caso 2 demonstra como o DEA permite a análise de eficiência comparando tanto empresas diferentes entre si como também comparações entre as mesmas companhias ao longo do tempo. Este método pode ser utilizado pelos reguladores para se determinar a eficiência de empresas reguladas, simulando um ambiente competitivo entre empresas que operam em mercados monopolísticos.

Por fim, apresenta-se no caso 3 um modelo DEA com múltiplos produtos (ER e NC), orientado a produto. Nesta abordagem o objetivo é verificar a extensão de rede a ser mantida e a quantidade de consumidores a ser supridos, dado o nível de custos operacionais eficientes. Os dados utilizados estão listados na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados parciais das Distribuidoras (Caso 3)

Distribuidora	Ano	Opex	ER	NC
CELESC	2007	756.184.574	127.346	2.148.092
CELG	2007	736.354.227	184.007	2.048.265
CEMIG	2007	1.774.784.778	433.858	6.439.993
COPEL	2007	856.222.030	216.863	3.437.093
CPFL – Paulista	2007	500.193.755	86.817	3.335.015
ELEKTRO	2007	424.867.305	103.791	2.005.109
ELETROPAULO	2007	1.139.787.894	44.530	5.651.915
CELESC	2008	744.858.775	135.528	2.207.083
CELG	2008	655.696.683	197.271	2.133.452
CEMIG	2008	1.699.703.653	455.440	6.690.189
COPEL	2008	878.914.611	220.791	3.523.573
CPFL – Paulista	2008	486.380.023	89.020	3.427.898
ELEKTRO	2008	411.222.070	105.825	2.067.357
ELETROPAULO	2008	1.044.552.699	44.913	5.830.961
CELESC	2009	721.455.274	144.896	2.237.127
CELG	2009	691.472.253	199.494	2.213.198
CEMIG	2009	1.682.334.644	460.219	6.832.546

COPEL	2009	1.018.866.491	224.817	3.628.209
CPFL – Paulista	2009	497.290.782	89.879	3.502.793
ELEKTRO	2009	414.602.018	107.116	2.123.670
ELETROPAULO	2009	1.249.143.613	45.213	5.987.873

Importante lembrar que, por se tratar de uma abordagem orientada a produto, o índice de eficiência θ_o deve ser maior que zero.

Por meio dos resultados obtidos, demonstrados na Tabela 9, pode-se constatar, por exemplo, que no ano de 2009 a ELETROPAULO deveria manter a rede e suprir mais consumidores na ordem de 47%, dada a receita permitida pela ANEEL para os custos operacionais naquele ano.

Tabela 9 – Resultados DEA VRS orientado a produto

Distribuidora	Ano	θ_o (VRS)
CELESC	2007	1,609
CELG	2007	1,197
CEMIG	2007	1,146
COPEL	2007	1,088
CPFL - Paulista	2007	1,056
ELEKTRO	2007	1,066
ELETROPAULO	2007	1,421
CELESC	2008	1,503
CELG	2008	1,000
CEMIG	2008	1,049
COPEL	2008	1,095
CPFL - Paulista	2008	1,000
ELEKTRO	2008	1,009
ELETROPAULO	2008	1,263
CELESC	2009	1,381
CELG	2009	1,038
CEMIG	2009	1,024
COPEL	2009	1,243
CPFL - Paulista	2009	1,001
ELEKTRO	2009	1,000
ELETROPAULO	2009	1,470

4 MENSURAÇÃO DA PRODUTIVIDADE TOTAL DOS FATORES DAS DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1 Cálculo do Índice de Produtividade Malmquist

A teoria econômica fornece uma série de diferentes formas de se calcular a Produtividade Total dos Fatores. Todos os índices de produtividades tradicionais utilizam informações de preços como forma de agregar as informações de produtos e insumos. Usam-se as receitas relacionadas aos produtos e os custos relacionados aos insumos.

Estes índices tradicionais aplicam fórmulas paramétricas para realizar estas aproximações e por isso são denominados de modelos paramétricos. Os mais conhecidos são os índices de Paasche, Laspeyres, Fisher e Tornqvist (The Measurement of Productivity Efficiency and Productivity Growth, Oxford University Press, Cap. 5, Pag. 523).

A alternativa à aplicação dos métodos paramétricos é o uso de uma metodologia que mantém uma relação maior com a definição original de produtividade, baseado em funções distâncias.

De acordo com Griffel e Lovell (1996), o Índice Malmquist, em comparação aos índices de Tornqvist e Fisher, apresenta as seguintes vantagens: (i) não exige a adoção da hipótese de maximização do lucro ou minimização do custo; (ii) não necessita de informações de preços dos produtos e insumos, o que pode distorcer as análises ou em alguns casos é até mesmo inexistente, e (iii) permite

a decomposição da evolução da PTF nas componentes Ganhos de Eficiência (“GE”) e Evolução Técnica (“ET”).

Diante de suas vantagens, o Índice Malmquist é o mais empregado para a definição da PTF. No entanto, é possível existir situações em que o seu valor coincide com o de Tornqvist ou de Fisher, conforme Coelli et al. (1998).

Além disso, de acordo com os estudos de Granderson e Linvill (1999), os resultados obtidos por meio da aplicação de metodologia paramétrica ou não-paramétrica não possuem grandes diferenças.

O Índice Malmquist é definido através de funções distâncias. Estas funções aplicam-se facilmente a tecnologias de produção multi-insumos e multi-produtos, sem necessidade da assunção da informação de preços dos produtos e insumos.

Adicionalmente, as funções distâncias podem ser calculadas tanto na orientação a insumos como a produtos. A primeira indica o mínimo consumo possível de insumos, dado o vetor de produto, e a segunda indica a máxima expansão possível no vetor de produtos, dado o consumo dos insumos.

A Figura 8 demonstra a função distância de um caso simples onde se tem um produto (y) gerado por apenas um insumo (x). A curva Ψ refere-se à fronteira de eficiência que, conforme discutido no capítulo anterior compreende todos os pontos eficientes.

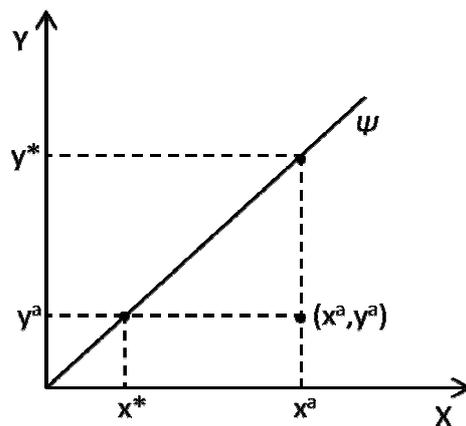


Figura 8 - Fronteira de Eficiência e Função Distância

Analisando o ponto “a”, que utiliza x^a unidades de insumos para produzir y^a unidades de produtos, verifica-se, claramente, que esta combinação não é a mais eficiente, considerando-se a curva Ψ .

Como já analisado no capítulo anterior, em uma condição eficiente, com a quantidade de insumos x^a deveriam ser produzidas y^* unidades de produtos. Desta forma a combinação (x^a, y^*) supera (x^a, y^a) , já que esta fornece a esta específica DMU mais produtos utilizando-se a mesma quantidade de insumos. Esta é a abordagem orientada a produto.

Similarmente, pela abordagem orientada a insumo, ter-se-ia a seguinte combinação (x^*, y^a) . Neste caso, a função distância seria, portanto, indicada pelo segmento de linha (x^a, y^a) a (x^*, y^a) .

O Índice Malmquist se origina da chamada função distância de Shepard (Shepard, 1970) que, em sua versão orientada a insumo, e considerando o período t como referência, pode ser representado por meio de (4-1).

$$D_o(x, y) = \max\{\theta : (x/\theta, y) \in \Psi\} \quad (4-1)$$

A medida de produtividade dar-se-á pela razão entre a função distância para uma unidade observada em $t+1$ e a observada em t , considerando-se a tecnologia existente em t . Desta forma, tem-se:

$$M_i^t = \frac{D_i^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^t(x^t, y^t)} \quad (4-2)$$

Ressalta-se que o ano base pode ser qualquer ano t ou $t+1$. Desta forma, desde que a escolha do período $t+1$ ou t é arbitrária, FÄRE et al. (1989) demonstrou que o Índice Malmquist é definido como a média geométrica das duas medidas, conforme formulado abaixo:

$$M_i^{t,t+1} = \left[\frac{D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^t(x^t, y^t)} \frac{D_i^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \quad (4-3)$$

Onde $M_i^{t,t+1}$ se refere ao Índice Malmquist do período t para o período $t+1$. Conforme já mencionado, uma das principais vantagens do Índice de Malmquist é que suas funções distâncias permitem a identificação de variações em relação à fronteira, tanto em termos de ganhos de eficiência quanto em evolução técnica, conforme já mencionado anteriormente.

Assim, reformulando-se a Equação (4.3), tem-se:

$$M_i^{t,t+1} = \frac{D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^t(x^t, y^t)} \times \left[\frac{D_i^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \frac{D_i^t(x^t, y^t)}{D_i^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \quad (4-4)$$

Onde

$$GE = \frac{D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^t(x^t, y^t)} \quad (4-5)$$

é o componente de ganhos de eficiência e

$$ET = \left[\frac{D_i^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \frac{D_i^t(x^t, y^t)}{D_i^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{1/2} \quad (4-6)$$

captura as taxas de evolução técnica.

O primeiro componente mede a distância de cada DMU da fronteira, a fim de verificar se sua produção está mais próxima ou afastada da referida fronteira, entre os períodos t e $t+1$ (efeito *catching up*).

O segundo componente, por sua vez, indica se houve progresso tecnológico entre os períodos t e $t+1$ e representa o deslocamento da fronteira devido à tecnologia.

Desta forma, um incremento no GE representa uma melhoria da produção em relação à fronteira, ou seja, um aumento de eficiência, enquanto que uma melhoria na componente ET revela ganhos por inovação tecnológica.

Conforme se pode verificar pela Equação (4-4), o cálculo do Índice Malmquist requer a solução de quatro funções distância. São elas: $D_i^t(x^t, y^t)$, $D_i^t(x^{t+1}, y^{t+1})$, $D_i^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$ e $D_i^{t+1}(x^t, y^t)$.

Estas quatro funções distância podem ser estimadas por meio da aplicação de métodos paramétricos ou não-paramétricos. A seguir, descreve-se o modelo de DEA para calcular o Índice Malmquist, desenvolvido por Färe et al. (1989).

Ressalta-se que, conforme demonstrado por Jamasb e Pollitt (2001), na prática regulatória, o método não-paramétrico como o DEA é o mais preferido entre os reguladores.

4.2 Método DEA Malmquist

Conforme discutido no capítulo 3, por meio da aplicação de DEA é possível determinar uma fronteira de eficiência de um conjunto de DMU's com múltiplos insumos e produtos.

As DMUs que estão na fronteira são aquelas com o máximo de produtos produzidos dado um certo nível de insumos ou com o mínimo de insumos consumidos dado um certo nível de produção, dependendo da orientação que se deseja dar na análise.

Färe et al. (1989) desenvolveu um modelo de cálculo do Índice Malmquist baseado na técnica de DEA, que mede as alterações de produtividade ao longo do tempo. Este índice baseado em DEA também pode ser decomposto nas suas duas componentes.

Na sequência, serão apresentados os modelos matemáticos aplicados para o cálculo do Índice Malmquist, baseados em CRS, que será utilizado neste trabalho para a determinação da produtividade das distribuidoras.

Cabe ressaltar que o modelo DEA utilizado assume retornos constantes de escalas, uma vez que os resultados de produtividade perdem precisão quando calculados com retornos variáveis de escala (GRIFELL-TATJÉ; E, LOVELL, 1995).

Suponha n DMU's, cada uma com m insumos x_i ($i=1, \dots, m$) para produzir s produtos y_r ($r=1, \dots, s$). Suponha também uma fronteira de eficiência no período de tempo t e uma no período de $t+1$.

Conforme já foi demonstrado, o cálculo do Índice Malmquist requer duas medidas de dois períodos separados entre si e duas medidas de dois períodos combinados entre si.

O modelo CRS DEA calcula a eficiência no período t conforme demonstrado a seguir:

$$\text{minimizar } z = \theta_0^t(x_0^t, y_0^t)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^t \leq \theta_0 x_0^t \quad (4-7)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_j^t \geq y_0^t$$

$$\lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n$$

Utilizando-se $t+1$ ao invés de t no modelo acima, tem-se :

$$\text{minimizar } z = \theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^{t+1} \leq \theta_0 x_0^{t+1} \quad (4-8)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_j^{t+1} \geq y_0^{t+1}$$

$$\lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n$$

A primeira medida dos períodos combinados, que é definida como $\theta_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})$ para cada DMU_0 , é o valor ótimo computado por meio do seguinte problema de programação linear:

$$\text{minimizar } z = \theta_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1}) \quad (4-9)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^t &\leq \theta_0 x_0^{t+1} \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j^t &\geq y_0^{t+1} \\ \lambda_j &\geq 0, j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

O modelo acima compara x_0^{t+1} com a Fronteira de Eficiência no período t . De maneira simular, obtém-se a medida de eficiência para o outro período combinado $\theta_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)$, que compara x_0^t com a fronteira de eficiência do período $t+1$, conforme demonstrado a seguir:

$$\text{minimizar } z = \theta_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_j^{t+1} &\leq \theta_0 x_0^t & (4-10) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_j^{t+1} &\geq y_0^t \\ \lambda_j &\geq 0, j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Então, o Índice de Produtividade Malmquist, considerando a orientação a insumo, pode ser descrito como:

$$M_0 = \frac{\theta_0^t(x_0^t, y_0^t)}{\theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \cdot \left[\frac{\theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{\theta_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \frac{\theta_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)}{\theta_0^t(x_0^t, y_0^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-11)$$

Onde

$$GE = \frac{\theta_0^t(x_0^t, y_0^t)}{\theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \quad (4-12)$$

e

$$ET = \left[\frac{\theta_0^{t+1}(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})}{\theta_0^t(x_0^{t+1}, y_0^{t+1})} \frac{\theta_0^{t+1}(x_0^t, y_0^t)}{\theta_0^t(x_0^t, y_0^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4-13)$$

4.3 Exemplo de Aplicação

A fim de se aplicar os conceitos discorridos ao longo deste capítulo, iremos calcular, em um caso exemplo, os índices médios de produtividade, de ganhos de eficiência e evolução técnica, por meio da aplicação do Índice Malmquist e suas decomposições.

Para este exemplo serão consideradas 5 Distribuidoras ao longo de 2006 a 2009, tendo como insumo o Opex e como produto o mercado de energia (ME), número de consumidores (NC) e extensão de rede (ER), conforme dados da Tabela 10.

Tabela 10 – Dados parciais das distribuidoras para o caso exemplo

DISTRIBUIDORAS	ANO	OPEX	ME	NC	ER
BANDEIRANTE	2006	325.626.257	12.745.317	1.364.735	26.814
COELCE	2006	311.878.152	6.898.065	2.416.184	95.997
ELEKTRO	2006	438.059.809	12.634.064	1.954.422	101.211
ELETROPAULO	2006	1.186.064.488	38.314.598	5.468.760	44.059
ESCELSA	2006	245.600.296	8.041.042	1.064.746	51.827
BANDEIRANTE	2007	301.980.713	13.186.525	1.401.444	27.018
COELCE	2007	341.736.951	7.362.091	2.490.241	106.140
ELEKTRO	2007	430.898.887	13.289.563	2.005.109	103.791
ELETROPAULO	2007	1.153.511.506	40.017.763	5.651.915	44.530
ESCELSA	2007	260.648.217	8.488.323	1.100.902	53.364

BANDEIRANTE	2008	303.910.899	13.661.826	1.438.804	27.216
COELCE	2008	338.130.577	7.676.948	2.683.269	114.974
ELEKTRO	2008	418.142.558	13.816.893	2.067.357	105.825
ELETROPAULO	2008	1.061.472.381	41.477.230	5.830.961	44.913
ESCELSA	2008	232.401.377	8.748.327	1.150.869	55.290
BANDEIRANTE	2009	279.779.539	12.708.804	1.482.518	27.496
COELCE	2009	325.234.143	7.929.212	2.744.830	120.300
ELEKTRO	2009	421.453.770	13.764.602	2.123.670	107.116
ELETROPAULO	2009	1.267.776.861	41.129.704	5.987.873	45.213
ESCELSA	2009	237.059.063	7.897.969	1.185.432	56.960

O índice de produtividade médio anual destas distribuidoras ao longo de 2006 a 2009, obtido por meio do Índice Malmquist, e suas decomposições estão apresentados na Figura 9.

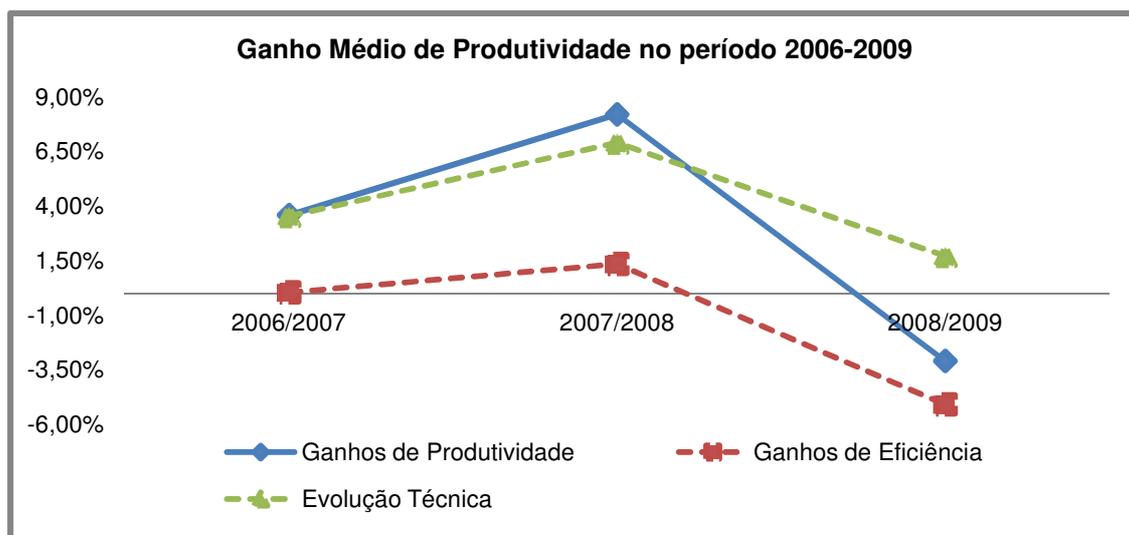


Figura 9 – Resultados do Índice de Malmquist e suas decomposições do caso exemplo

Os resultados encontram-se dispostos na Tabela 11, nos quais valores maiores que a unidade implica em ganhos de produtividade, enquanto que valores menores que a unidade implica em perdas de produtividade.

Tabela 11 – Produtividade Média Anual

Distribuidoras	IM	GE	ET
BANDEIRANTE	5,35%	0,00%	5,35%
COELCE	4,11%	0,00%	4,11%
ELEKTRO	3,56%	0,55%	2,91%
ELETROPAULO	-0,32%	-5,96%	5,26%
ESCELSA	1,82%	-0,73%	2,67%
Média	2,90%	-1,23%	4,06%

Os resultados demonstram, portanto, que no período analisado estas Distribuidoras tiveram um ganho de produtividade médio de 2,90%. Além disso, é possível interpretar que houve um deslocamento da fronteira, resultante da inovação tecnológica (ET= 4,06%), porém com um afastamento da eficiência da produção com relação à fronteira (GE = -1,23%).

5 INFERÊNCIAS ESTATÍSTICAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE *BOOTSTRAP* (REAMOSTRAGEM)

Uma preocupação que se tem ao aplicar a metodologia de DEA é que, pelo fato dos resultados serem oriundos de programação linear, trata-se de uma técnica sem relação com a inferência estatística tradicional.

Diante disto, antes de se tirar conclusões sobre os resultados de produtividade alcançados por meio da aplicação do Índice Malmquist, baseados em DEA, é fundamental a realização de análises estatísticas para se verificar algumas condições primordiais são atendidas, tais quais: (i) se os índices são significativos, (ii) se estão enviesados, (iii) se o viés se torna insignificante à medida que o tamanho da amostra tende ao infinito e (iv) se é possível se estimar intervalos de confiança.

Para tanto, o método de *bootstrap* aparece como uma alternativa atrativa para se fazer inferências nos casos de aplicação de DEA com múltiplos insumos e produtos.

Os conceitos discorridos neste item seguem Simar & Wilson (2000) e estão todos em termos de orientação a insumo (as mesmas análises podem ser facilmente alternadas para orientação a produto).

Tem-se que o conjunto original de dados χ_n são gerados do processo de geração de dados – DGP (sigla em inglês para Data-Generating Process), que é completamente caracterizado pelo conhecimento da função de produção Ψ e da função de probabilidade $f(x,y)$. Onde $\Psi = \{(x,y) \in \mathcal{R}_+^{N+M} / x \text{ pode produzir } y\}$, e onde $x \in \mathcal{R}_+^N$ é o vetor de insumos e $y \in \mathcal{R}_+^M$ é o vetor de produtos.

Deixe P denotar DGP. Então, tem-se $P = P[\Psi, f(x, y)]$. Tendo-se então $\hat{P}(X_n)$ como um consistente estimador de P , tem-se $\hat{P} = P[\hat{\Psi}, \hat{f}(x, y)]$.

Na realidade P , Ψ e $\theta(x, y)$ são desconhecidos. Apenas os dados χ_n são observados e devem ser utilizados para construir estimativas de P , Ψ e $\theta(x, y)$. No entanto, quando se trata do contexto *bootstrap*, as estimativas \hat{P} , $\hat{\Psi}$ e $\hat{\theta}(x, y)$ substituem P , Ψ e $\theta(x, y)$ do “mundo real”.

Em outras palavras, no mundo real P é o verdadeiro DGP, enquanto que \hat{P} é uma estimativa de P . No entanto, no mundo do *bootstrap* \hat{P} é o verdadeiro DGP. Neste contexto, um novo conjunto de dados $\chi_n^* = \{(x_i^*, y_i^*), i = 1, \dots, n\}$ pode ser desenhado de \hat{P} , uma vez que trata-se de uma estimativa conhecida.

Dentro do contexto do *bootstrap*, $\hat{\Psi}^*$ é o verdadeiro conjunto possível, e considerando χ_n^* , resulta em:

$$\hat{\Psi}^* = \hat{\Psi}(\chi_n^*) = \left[(x, y) \in \mathcal{R}_+^{N+M} / y \leq \sum_{i=1}^n y_i y_i^*, x \geq \sum_{i=1}^n y_i x_i^*, \sum_{i=1}^n y_i = 1, y_i \geq 0 \forall i = 1, \dots, n \right] \quad (5-1)$$

Para um dado ponto (x, y) , um estimador de $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$ é fornecido por:

$$\hat{\theta}_{VRS}^*(x, y) = \inf \{ \theta / (\theta x, y) \in \hat{\Psi}^* \} \quad (5-2)$$

Relembrando que no mundo *bootstrap* $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$ é o valor estimado, analogamente a $\theta(x, y)$ no mundo real.

O estimador $\hat{\theta}_{VRS}^*(x, y)$ pode ser resolvido por meio de programação linear da seguinte equação:

$$\hat{\theta}_{VRS}^*(x, y) = \min \theta$$

Sujeito a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n y_i y_i^* &\geq y \\ \sum_{i=1}^n y_i x_i^* &\leq \theta x \\ \sum_{i=1}^n y_i &= 1 \\ y_i &\geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \end{aligned} \tag{5-3}$$

A relação central referente a esta questão é que no contexto do mundo real $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$ é um estimador de $\theta(x, y)$ baseado em uma amostra χ_n gerada por P . Enquanto que no mundo *bootstrap*, $\hat{\theta}_{VRS}^*(x, y)$ é um estimador de $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$ baseado em pseudo-amostras χ_n^* gerados de $\hat{P}(\chi_n)$. Assim, se o *bootstrap* for consistente, tem-se:

$$(\hat{\theta}_{VRS}^*(x, y) - \hat{\theta}_{VRS}(x, y) / \hat{P}(\chi_n)) \sim (\hat{\theta}_{VRS}(x, y) - \theta(x, y) / P) \tag{5-4}$$

Dentro do mundo *bootstrap* e condicionado aos dados observados χ_n , a distribuição de amostragem de $\hat{\theta}_{VRS}^*(x, y)$ é conhecida desde que $\hat{P}(\chi_n)$ é conhecido. No entanto, na prática, é impossível realizar este cálculo analiticamente. Desta forma, simulações Monte Carlo são necessárias para se aproximar o lado esquerdo da equação acima.

Utilizando-se $\hat{P}(\chi_n)$ para gerar B amostras χ_{nb}^* de tamanho n, b= 1,...,B e aplicando o estimador original para estas pseudo-amostras, resulta em um conjunto de B pseudo-estimativas $\hat{\theta}_{VRS,b}^*(x, y)$, b=1,...,B. A distribuição empírica destes valores de *bootstrap* resulta em uma estimativa Monte Carlo da distribuição da amostragem de $\hat{\theta}_{VRS}^*(x, y)$, condicionada a $\hat{P}(\chi_n)$, que é o lado esquerdo da equação acima.

A qualidade desta estimativa depende, em grande parte, do valor de B. Quando B tende a infinito, o erro desta estimativa devido à reamostragem do *bootstrap* tende a zero. Desta forma, quanto maiores os valores de B, normalmente limitados pela capacidade de processamento do computador, melhores serão os resultados obtidos.

5.1 Correção de viés por *bootstrap*

Pelas considerações já realizadas, verifica-se que os índices estimadores DEA são enviesados por definição. Ou seja,

$$Viés\left(\hat{\theta}_{VRS}(x, y)\right) = E\left(\hat{\theta}_{VRS}(x, y)\right) - \theta(x, y) \quad (5-5)$$

Analogamente, tem-se que a estimativa do viés para o estimador original $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$, por meio da aplicação de *bootstrap* é dado por:

$$\widehat{Viés}_B\left(\hat{\theta}_{VRS}(x, y)\right) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{\theta}_{VRS,b}^*(x, y) - \hat{\theta}_{VRS}(x, y) \quad (5-6)$$

Desta forma, o estimador não-enviesado de $\theta(x, y)$ pode ser obtido computando-se a fórmula abaixo:

$$\begin{aligned}\hat{\hat{\theta}}_{VRS}(x, y) &= \hat{\theta}_{VRS}(x, y) - \widehat{Vies}_B(\hat{\theta}_{VRS}(x, y)) \\ &= 2\hat{\theta}_{VRS}(x, y) - \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{\theta}_{VRS,b}^*(x, y) - \hat{\theta}_{VRS}(x, y)\end{aligned}\quad (5-7)$$

No entanto, esta correção do viés adiciona, por sua vez, um erro adicional. O erro médio quadrático de $\hat{\hat{\theta}}_{VRS}(x, y)$ pode ser maior que o erro médio quadrático de $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$. A variância da amostra dos valores de *bootstrap* de $\hat{\theta}_{VRS,b}^*(x, y)$, dada pela fórmula abaixo, fornece uma estimativa da variância de $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$. Então, a variância do estimador não-enviesado $\hat{\hat{\theta}}_{VRS}(x, y)$ é aproximadamente $4\hat{\sigma}^2$.

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \left[\hat{\theta}_{VRS,b}^*(x, y) - \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{\theta}_{VRS,b}^*(x, y) \right]^2 \quad (5-8)$$

Conclui-se, portanto, que a correção de viés por *bootstrap* deve ser usada quando $4\hat{\sigma}^2$ for bem menor que $\left[\widehat{Vies}_B(\hat{\theta}_{VRS}(x, y)) \right]^2$, caso contrário é bem provável que o estimador $\hat{\hat{\theta}}_{VRS}(x, y)$ tenha um erro médio quadrático maior que o erro médio quadrático de $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$.

5.2 *Bootstrapping* DEA

O ponto em questão agora é como se pode simular uma amostra de *bootstrap* χ_n^* oriunda de um estimador consistente de P .

A mais simples técnica não paramétrica de *bootstrap*, chamada de *bootstrap* “ingênuo” consiste em desenhar pseudo-observações (x_i^*, y_i^*) independentemente, uniformemente e com reposição do conjunto χ_n de observações originais. Infelizmente, esta técnica de *bootstrap* é inconsistente no contexto de estimativas de fronteiras. Em outras palavras significa que mesmo quando $B \rightarrow \infty$ e $n \rightarrow \infty$, a distribuição empírica de Monte Carlo de $\hat{\theta}_{VRS,b}^*(x, y)$ não é capaz de estimar a distribuição amostral de $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$.

Na literatura sobre *bootstrap* existe uma série de exemplos univariados deste tipo de problema. SIMAR e WILSON (1999a,1999b) discutem esta questão no contexto de estimativas de fronteiras multivariadas. O problema vem do fato de que em um *bootstrap* “ingênuo”, a faceta eficiente ao determinar o valor de $\hat{\theta}_{VRS}(x, y)$ aparece muito freqüentemente e com uma probabilidade fixa nas pseudo-amostras χ_n^* . Esta probabilidade fixa não depende do DGP real e não desaparece mesmo quando $n \rightarrow \infty$.

Duas soluções para este problema podem ser aplicadas: as técnicas de subamostragem (*subsampling*) ou as técnicas de alisamento (*smoothing*).

Dentre as duas soluções identificadas, a primeira é a mais simples de se implementar, uma vez que é similar ao *bootstrap* “ingênuo”, exceto pelo fato de que neste caso pseudo-amostras $m=n^k$ são definidas, para $k \in (0,1)$.

Assim, deixe $\hat{\theta}_{VRS,m,b}^*(x, y)$ denotar a estimativa de eficiência DEA para o ponto (x, y) computado utilizando-se a amostra de referência $\chi_{n_{m,b}}^*$. Kneip et al. (2003) demonstrou que a distribuição empírica de Monte Carlo de $m^{2/(N+M+1)} \left(\hat{\theta}_{VRS,m,b}^*(x, y) - \hat{\theta}_{VRS}(x, y) \right)$ dado χ_n se aproxima exatamente da distribuição amostral de $n^{2/(N+M+1)} \left(\hat{\theta}_{VRS}(x, y) - \theta(x, y) \right)$ quando $B \rightarrow \infty$.

Desta forma, utilizando-se esta aproximação, o viés dos estimadores de DEA é obtido computando-se:

$$\widehat{Viés}_B \left(\hat{\theta}_{VRS}(x, y) \right) = \left(\frac{m}{n} \right)^{\frac{2}{(N+M+1)}} \times \left[\frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \hat{\theta}_{VRS, m, b}^*(x, y) - \hat{\theta}_{VRS}(x, y) \right] \quad (5-9)$$

E o viés do índice de eficiência DEA é dado por:

$$\hat{\theta}_{VRS}(x, y) = \hat{\theta}_{VRS}(x, y) - \widehat{Viés}_B \left(\hat{\theta}_{VRS}(x, y) \right) \quad (5-10)$$

Os conceitos aqui demonstrados sobre a aplicação de *bootstrap* DEA podem ser estendidos para a realização de inferências estatísticas nos Índices Malmquist e em suas decomposições.

No item a seguir será demonstrada uma aplicação de inferências estatísticas nos Índices Malmquist para um caso exemplo.

5.3 Caso exemplo de aplicação de *bootstrap* nos Índices Malmquist

Os conceitos anteriormente descritos serão aplicados para se determinar os intervalos de confiança, para um nível de significância de 5%, dos Índices Malmquist para as mesmas distribuidoras do caso exemplo do item 4.3. Os dados utilizados são os mesmos da Tabela 10.

Através dos intervalos de confiança é possível aferir se os resultados são estatisticamente significativos ou não.

Apenas é possível se afirmar estatisticamente que existem ganhos de produtividade nos casos em que intervalo de confiança deste índice for todo positivo. Da mesma forma, para perdas de produtividade o intervalo deve ser todo negativo. No entanto, se o intervalo contiver valores positivos e negativos, não é possível se afirmar estatisticamente se houve perda ou ganho de produtividade.

O exemplo a seguir demonstra esta questão, considerando-se um nível de significância de 5% e B=1.000.

Tabela 12 – Índices Malmquist com os respectivos intervalos de confiança (caso exemplo)

Distribuidoras	2006 / 2007		2007 / 2008		2008 / 2009	
BANDEIRANTE	10,18%	10,54% 9,81%	2,67%	3,05% 2,29%	2,72%	5,46% -0,02%
COELCE	-3,87%	-0,47% -7,26%	8,02%	8,38% 7,66%	6,69%	7,64% 5,74%
ELEKTRO	5,10%	6,13% 4,06%	5,66%	6,40% 4,92%	-0,11%	0,91% -1,13%
ELETROPAULO	6,35%	6,84% 5,86%	10,98%	11,21% 10,74%	-18,15%	-15,75% -20,55%
ESCELSA	-1,26%	-0,44% -2,09%	13,68%	13,96% 13,40%	-7,23%	-1,94% -12,52%

A primeira coluna de cada período em análise corresponde ao Índice Malmquist, enquanto que a segunda coluna demonstra os seus respectivos intervalos de confiança.

Verifica-se, portanto, que pelas análises dos intervalos de confiança, no período de 2008/2009 não é possível se afirmar se a Bandeirante teve um progresso e se a Elektro teve um regresso de produtividade (valores em vermelho).

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Base de dados utilizada

A base de dados utilizadas neste trabalho é oriunda das informações disponibilizadas no *website* da ANEEL, no âmbito da Audiência Pública nº 042/2010. Desta forma, pode-se concluir que os mesmos podem ser considerados confiáveis.

As análises restringirão a 19 distribuidoras, no período de 2003 a 2009. Estas distribuidoras estão localizadas nos diversos Estados brasileiros e foram selecionadas pelo seguinte critério: possuir características de Monopólio Natural Forte. Assim, foram selecionadas apenas as empresas cujo Capex era maior que o Opex na composição de suas receitas.

Entende-se que desta forma, as análises estariam mais condizentes com o retorno de escala do mercado em que elas se inserem: retorno de escala não-decrescente (constante ou crescente), que, por sua vez, é o que melhor reflete as características de mercado monopolístico.

As distribuidoras assim selecionadas foram: AES Sul, Ampla, Bandeirante, CEEE, Celpe, Cemar, Cemat, Cemig, Coelba, Coelce, Cosern, CPFL – Paulista, CPFL – Piratiniga, Elektro, Eletropaulo, Enersul, Escelsa, Light e RGE e as respectivas razões entre CAPEX e OPEX estão relacionadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuidoras - Monopólio Natural Forte

Distribuidoras	Capex/Opex
AES SUL	1,43
AMPLA	1,47
BANDEIRANTE	1,28
CEEE	1,11
CELPE	1,30
CEMAR	1,74
CEMAT	1,06
CEMIG	1,07
COELBA	1,82
COELCE	1,33
COSERN	1,40
CPFL – Paulista	1,63
CPFL - Piratininga	1,47
ELEKTRO	1,51
ELETROPAULO	1,38
ENERSUL	1,42
ESCELSA	1,52
LIGHT	2,18
RGE	1,72

Apesar de se reduzir substancialmente a quantidade de distribuidoras das análises comparativas, as 19 empresas selecionadas atendem aproximadamente 75% do mercado cativo total de energia elétrica nacional. Desta forma, pode-se assumir que os resultados obtidos podem representar os resultados do setor de distribuição de energia elétrica brasileiro como um todo.

Com relação às variáveis a serem utilizadas como insumos e produtos, foram consideradas as mesmas que foram aplicadas pela ANEEL em suas análises, quais sejam: mercado de energia elétrica (divididos em AT, MT e BT), número de consumidores atendidos, extensão da rede e o Opex. Destas, apenas a última corresponde aos insumos. As demais correspondem aos produtos resultados do processo.

As variáveis selecionadas estão entre as mais frequentemente utilizadas em estudos de eficiência dos serviços de distribuição e de transmissão de energia elétrica. (JAMASB; POLLITT, 2003). As mesmas estão resumidas na Tabela 14 abaixo.

Tabela 14 – Relação de insumos e produtos

Insumos	Produtos
	ER
Opex	NC
	ME (AT,MT,BT)

O conjunto de dados utilizados para a simulação das análises realizadas neste estudo estão no Anexo 1. Uma análise estatística dos dados utilizados neste estudo é apresentada na Tabela 15, em que se constata uma grande variação de produtos e insumos entre as diversas DMUs no período observado.

Tabela 15 - Principais informações estatísticas dos dados utilizados no estudo

	Opex	ER	ME(AT)	ME(MT)	ME(BT)	NC
Média	423.031.757	87.674	3.281.001	3.714.862	5.633.311	2.244.879
Máximo	1.869.287.127	460.219	19.923.040	13.492.795	21.810.716	6.832.546
Mínimo	116.228.517	20.007	120.385	616.451	1.498.041	620.344
Desvio-padrão	370.010.816	85.594	3.838.898	2.903.747	4.542.046	1.569.901

Constata-se um grande desvio-padrão das variáveis das DMUs em análise, o que leva a concluir que há uma grande heterogeneidade entre as distribuidoras analisadas. É importante deixar este ponto bem claro nesta etapa do trabalho, pois os resultados aqui obtidos levarão em conta esta característica.

Uma vez definido os dados, aplicam-se os conceitos descritos nos capítulos 3 e 4 para se determinar, respectivamente, a eficiência e a produtividade das distribuidoras do setor elétrico brasileiro.

No entanto, apenas a aplicação direta destes conceitos não garante resultados significativos quanto à eficiência e produtividade das DMUs em análise. Isto porque, como já anteriormente discutido, a natureza determinística da

metodologia de DEA não permite inferir quaisquer significados estatísticos dos resultados alcançados.

Desta forma, o método desenvolvido por Simar e Wilson (1999a) será aplicado nas análises a fim de se determinar se as estimativas de eficiência e de produtividade das distribuidoras são de fato robustas do ponto de vista estatístico.

6.2 Estimativa de Eficiência das Distribuidoras através da metodologia DEA

Um ponto fundamental para a determinação da eficiência, do ponto de vista do Regulador, é qual orientação a se utilizar na análise realizada. Ou do ponto de vista de se minimizar os insumos ou então, por outro lado, de se maximizar os produtos.

Para esta decisão, deve-se levar em consideração os aspectos gerenciáveis do processo em estudo. Neste sentido, as distribuidoras têm pouca influência no comportamento da demanda e consumo de energia do seu mercado cativo. No entanto, possuem capacidade gerencial sobre os recursos para manter os níveis de operação e manutenção e de investimentos de sua rede de distribuição, a fim de atender os consumidores com um nível adequado de qualidade.

De forma então que, apenas por este motivo, para o setor de distribuição de energia, a orientação a insumo parece a mais condizente. Além de permitir ao regulador objetivar a minimização dos custos das distribuidoras.

Esta é a orientação adotada pela ANEEL para a determinação do Índice Malmquist, e vem sendo utilizada por outros estudos, como os estudos de eficiência do setor de eletricidade na Finlândia, Noruega e Suécia (KINNUNEN, 2004).

Conforme apresentado no item 3.3, existem modelos variáveis de retorno de escalas (retornos de escala constantes, crescentes e decrescentes). De forma que outro ponto que se deve levar em consideração nas análises é qual o retorno de escala a ser considerado.

Neste caso, uma vez que a distribuição de energia elétrica constitui um Monopólio Natural, espera-se ganhos de escalas crescentes. De forma que deve ser considerado o modelo NDRS.

Assim, estabelecidas estas premissas, aplicando-se o modelo DEA NDRS, orientada a insumo, considerando então as 133 DMUs disponíveis, estimou-se a eficiência das distribuidoras. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16 – Índices de Eficiências

Distribuidoras	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Eficiência Média
AES SUL	1,000	0,976	0,930	0,930	0,926	0,878	0,869	0,930
AMPLA	0,654	0,605	0,555	0,521	0,529	0,589	0,612	0,581
BANDEIRANTE	0,720	0,675	0,702	0,623	0,685	0,703	0,738	0,692
CEEE	0,557	0,553	0,555	0,579	0,575	0,597	0,520	0,562
CELPE	0,728	0,758	0,742	0,668	0,700	0,831	0,855	0,755
CEMAR	0,662	0,702	0,865	0,938	1,000	0,942	0,905	0,859
CEMAT	0,546	0,498	0,625	0,568	0,610	0,744	0,756	0,621
CEMIG	1,000	1,000	0,934	0,901	0,907	1,000	1,000	0,963
COELBA	0,720	0,772	0,847	0,803	0,841	1,000	1,000	0,855
COELCE	0,773	0,834	0,813	0,789	0,739	0,799	0,847	0,799
COSERN	0,939	0,999	1,000	0,855	0,883	1,000	1,000	0,954
CPFL - Paulista	0,877	0,963	0,918	0,960	0,944	1,000	1,000	0,952
ELEKTRO	0,685	0,720	0,675	0,646	0,695	0,741	0,744	0,701
ELETROPAULO	0,635	0,815	0,830	0,816	0,883	1,000	1,000	0,854
ENERSUL	0,855	0,833	0,747	0,617	0,653	0,733	0,752	0,741

ESCELSA	0,974	0,963	0,907	0,774	0,756	0,871	0,756	0,857
LIGHT	0,726	0,916	1,000	0,789	0,752	0,905	0,956	0,864
PIRATININGA	0,945	1,000	1,000	1,000	0,893	1,000	1,000	0,977
RGE	1,000	0,835	0,927	0,906	0,990	1,000	1,000	0,951
Eficiência Média	0,789	0,811	0,820	0,773	0,787	0,860	0,858	0,814

Das 133 DMUs, 24 compõem a fronteira de eficiência, que são aquelas cujos índices estão grifados na tabela acima. Adicionalmente, verificam-se flutuações dos índices de eficiência ao longo dos anos, em torno da eficiência média, conforme se pode melhor visualizar no gráfico da Figura 10:

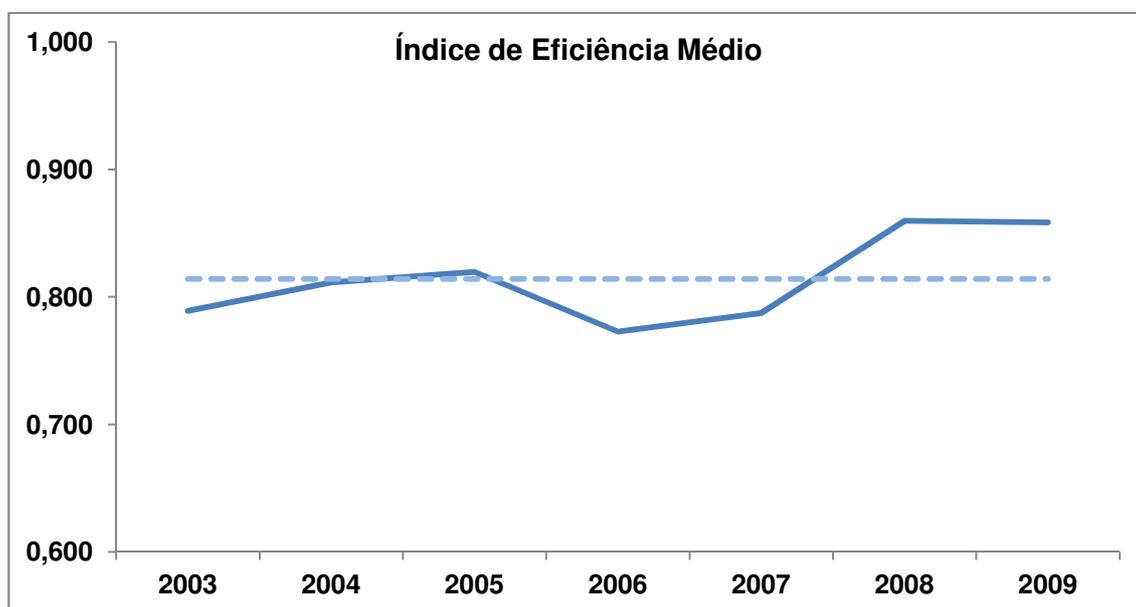


Figura 10 - Índice de Eficiência Médio das Distribuidoras

Pelo gráfico na Figura 10 é possível observar que índices aumentam entre 2003 a 2005. Em 2006 há uma queda no índice de eficiência médio a nível inferior a 2003. Porém, a partir de 2007, observa-se uma um novo salto na eficiência média.

Por meio destas análises, é possível concluir que o potencial médio para redução de custos operacionais eficientes das distribuidoras é de 18,6%.

A seguir são realizadas as inferências estatísticas por meio da técnica de *bootstrap*, para se verificar se estes resultados são estatisticamente significativos.

6.2.1 Inferência Estatística através de *Bootstrap*

Para se corrigir os valores de eficiência tendo em vista o erro aleatório inerente aos dados utilizou-se a abordagem proposta por Simar e Wilson (1998). Por meio desta, aplica-se a técnica de *bootstrap* à metodologia de DEA para proceder com a inferência estatística dos resultados de eficiência obtidos pelo modelo DEA.

Assim, é possível estimar para cada DMU, o intervalo de confiança da eficiência, o viés e a eficiência corrigida, que será a considerada para a avaliação de desempenho das distribuidoras.

A Tabela 17 apresenta os índices de eficiência originais (enviesados), o viés e os índices corrigidos pela técnica de *bootstrap*. Os resultados de *bootstrap* foram gerados por uma reamostragem de 5.000 pseudo-amostras (B=5.000).

Tabela 17 – Índice de Eficiência das Distribuidoras após aplicação de *Bootstrap*

Distribuidoras	Eficiência Média enviesada	Viés	Eficiência Média corrigida
AES-SUL	0,930	0,156	0,774
AMPLA	0,581	0,094	0,487
BANDEIRANTE	0,692	0,114	0,578
CEEE	0,562	0,076	0,486
CELPE	0,755	0,134	0,620
CEMAR	0,859	0,156	0,704
CEMAT	0,621	0,109	0,512
CEMIG	0,963	0,280	0,683
COELBA	0,855	0,173	0,682
COELCE	0,799	0,138	0,661

COSERN	0,954	0,159	0,795
CPFL - Paulista	0,952	0,183	0,769
ELEKTRO	0,701	0,117	0,583
ELETROPAULO	0,854	0,266	0,588
ENERSUL	0,741	0,120	0,621
ESCELSA	0,857	0,136	0,722
LIGHT	0,864	0,162	0,702
PIRATININGA	0,977	0,188	0,788
RGE	0,951	0,178	0,773
MÉDIA	0,814	0,155	0,659

Pelos resultados pode-se constatar a significativa influência dos índices de eficiência com relação às variações das amostras, reduzindo a eficiência média em 15,50%. Os valores da eficiência média corrigida, em alguns casos, são consideravelmente diferentes em magnitude quando comparados com os valores originais. Observe, por exemplo, o caso da CEMIG que após a aplicação de *bootstrap* teve seu índice corrigido de 96,30% para 68,30%.

Na verdade, o que se verifica é que se fazendo uma análise puramente determinística, sem considerar a influência do viés estatístico, os resultados encontrados estão superestimado.

Isto fica claro ao se observar a Figura 11, em que os índices de eficiência sem o *bootstrap* estão sempre fora do intervalo de confiança para as 133 DMUs em análise, considerando-se um nível de significância de 5%, mostrando que, de fato, os resultados sem *bootstrap* são superestimados.

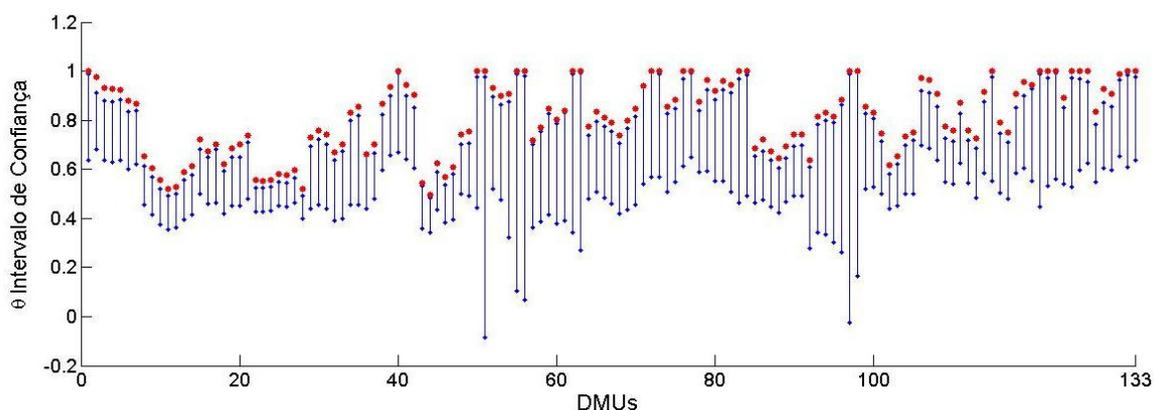


Figura 11 – Resultados estatísticos dos índices de eficiência das distribuidoras

Este ponto demonstra a importância de se realizar a análise de *bootstrap* ao se estimar os índices de eficiências de DMUs, e indica que deve haver grande cautela ao se realizar análises comparativas de eficiência entre unidades por meio da aplicação de DEA.

6.3 Índices de Produtividade Malmquist

Neste item, as análises serão voltadas para a determinação dos ganhos de produtividade das distribuidoras ao longo dos anos, por meio da aplicação da metodologia de Malmquist, descrita no Capítulo 4.

Na Tabela 18 a seguir são apresentados para cada distribuidora analisada os ganhos de produtividade obtidos no período entre 2003 e 2009. Os valores positivos indicam que houve progresso, enquanto que valores negativos indicam regresso de produtividade.

Tabela 18 – ganho de produtividade das distribuidoras entre 2003 e 2009

Distribuidoras	2003 / 2004	2004 / 2005	2005 / 2006	2006 / 2007	2007 / 2008	2008 / 2009
AES SUL	-6,26%	-4,86%	0,47%	-0,17%	-5,45%	-1,73%
AMPLA	-7,42%	-8,51%	-7,15%	0,19%	10,61%	4,09%
BANDEIRANTE	-6,51%	3,32%	-9,66%	9,31%	-0,37%	-0,25%
CEEE	-0,37%	0,30%	4,43%	-0,67%	4,09%	-13,98%
CELPE	3,20%	-0,27%	-11,14%	4,90%	16,42%	3,65%
CEMAR	9,13%	22,55%	7,89%	10,33%	-5,32%	-2,97%
CEMAT	-7,89%	24,60%	-7,74%	10,97%	18,00%	1,72%
CEMIG	-0,51%	-15,42%	-3,89%	-2,25%	6,40%	-13,62%
COELBA	7,45%	9,17%	-3,41%	5,45%	16,96%	1,68%
COELCE	8,12%	-0,66%	-2,72%	-5,65%	7,49%	6,48%
COSERN	9,17%	6,09%	-11,63%	7,24%	15,79%	2,67%
CPFL - Paulista	6,90%	-2,25%	5,87%	-0,90%	6,65%	1,26%
ELEKTRO	5,19%	4,26%	2,02%	-14,71%	11,96%	-3,02%
ELETROPAULO	4,23%	-7,04%	-5,30%	5,21%	6,65%	1,81%
ENERSUL	21,61%	0,98%	-2,31%	7,45%	12,41%	-17,00%
ESCELSA	1,99%	-7,19%	-13,73%	15,55%	13,55%	4,89%
LIGHT	-0,87%	-5,93%	-17,93%	-2,96%	12,78%	-17,75%
PIRATININGA	11,42%	11,81%	-9,78%	-5,57%	15,57%	11,83%
RGE	-21,39%	10,65%	-2,49%	7,34%	2,50%	0,82%

O Índice Malmquist médio das distribuidoras ao longo dos anos foi de 1,57%, conforme se pode verificar por meio da tabela abaixo, onde também estão listados os valores médios de ganho de eficiência e evolução técnica das distribuidoras.

Tabela 19 – Ganhos Médios de Produtividade das Distribuidoras (2003-2009)

	2003 /2004	2004 /2005	2005 /2006	2006 /2007	2007 /2008	2008 /2009	Média
Índice de Malmquist (IM)	1,96%	2,19%	-4,64%	2,69%	8,77%	-1,55%	1,57%
Ganhos de Eficiência (GE)	0,27%	0,64%	-5,49%	1,49%	0,63%	-2,49%	-0,82%
Evolução Técnica (ET)	1,72%	1,61%	0,78%	1,05%	8,14%	0,94%	2,37%

Estes valores estão representados na Figura 12 para uma melhor visualização das flutuações dos índices ao longo do período em análise.

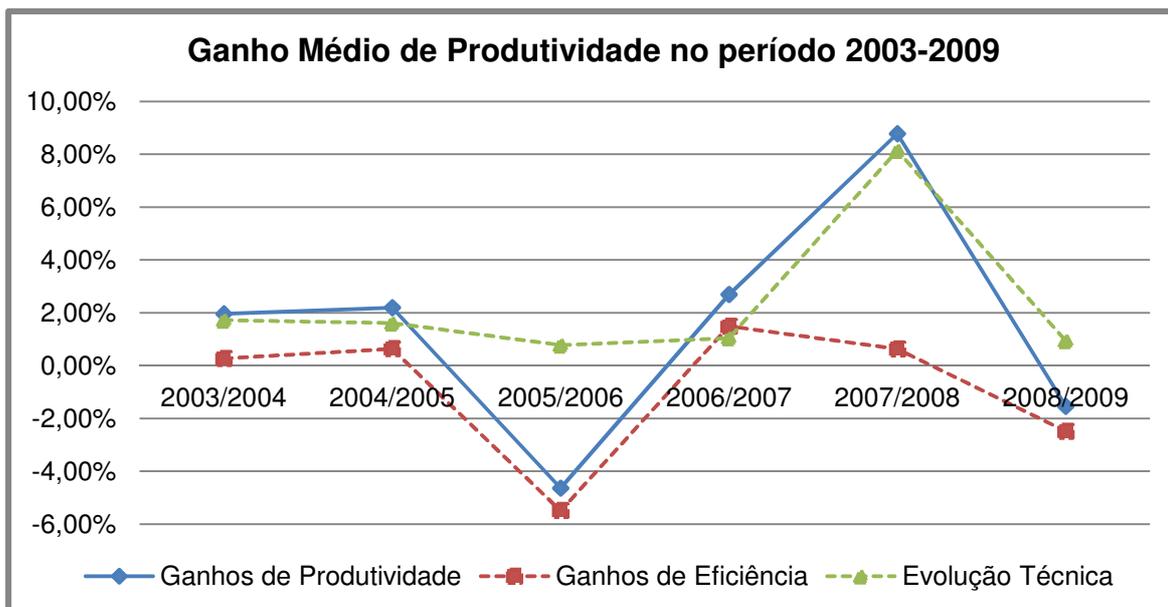


Figura 12 - Índice Malmquist e suas decomposições ao longo de 2003 a 2009

A melhoria da evolução técnica (alteração da fronteira tecnológica) indica que houve evolução nas práticas adotadas nas Distribuidoras, no entanto, a variação de eficiência observada demonstra um afastamento das distribuidoras em relação à fronteira de eficiência, no período analisado.

Na seqüência, serão analisados os ganhos de produtividade, combinada à técnica de *bootstrap*, para se obter informações estatísticas dos resultados.

6.3.1 Inferência estatística através de *bootstrap*

Para se estimar a robustez dos índices estimados para cada DMU, deve ser calculado o intervalo de confiança para o Índice Malmquist e suas decomposições, utilizando a técnica proposta por Simar e Wilson (1999).

Os valores resultantes da análise de *bootstrap* dão um significado muito mais confiável aos Índices Malmquist obtidos. Aplicando-se *bootstrap*, para $B=3.000$, o

ganho médio de produtividade obtido foi de 1,34%, o que ficou bem próximo do resultado sem *bootstrap*, conforme se pode perceber pela Figura 13 abaixo.

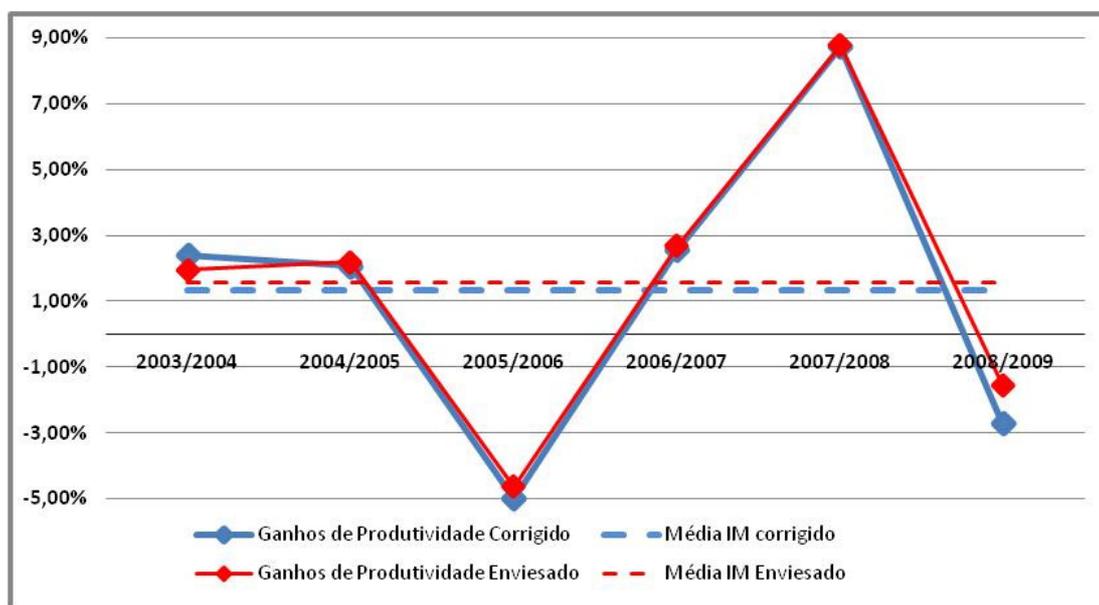


Figura 13 – Índices de Produtividade enviesado e corrigido

No entanto, apesar de as médias terem ficado muito próximas uma às outras, o ponto mais relevante diz respeito aos intervalos de confiança resultantes deste processo.

Os intervalos de confiança permitem verificar efetivamente se cada índice é diferente de zero. Isto significa que se o intervalo contiver o valor zero, não há evidência estatística de que tenham ocorridos alterações significativas quanto à produtividade analisada. Na verdade, nestes casos não tem como se afirmar a DMU no período obteve um regresso ou um progresso de produtividade.

Por outro lado, se os limites dos intervalos forem inferiores a zero, significa que há evidências estatísticas que houve um regresso de produtividade. Enquanto que se os limites dos intervalos forem maiores que zero, há evidências que houve um ganho de produtividade.

Os ganhos de produtividade médios corrigidos por meio da aplicação do *bootstrap* estão demonstrados na Tabela 20, para um nível de significância de 5%.

Tabela 20 – Estimativa dos Ganhos de Produtividade das Distribuidoras considerando o *bootstrap* com B=3.000

Distribuidoras	2003 / 2004	2004 / 2005	2005 / 2006	2006 / 2007	2007 / 2008	2008 / 2009
AES SUL	-5,38%	-5,31%	0,40%	-1,10%	-4,50%	-3,92%
AMPLA	-7,47%	-8,36%	-6,97%	0,29%	10,58%	3,75%
BANDEIRANTE	-3,84%	3,70%	-11,92%	9,26%	0,33%	-3,34%
CEEE	-0,12%	0,55%	4,41%	-0,83%	4,09%	-14,54%
CELPE	3,44%	-0,28%	-10,94%	4,89%	16,27%	2,74%
CEMAR	10,10%	22,57%	8,03%	11,27%	-5,62%	-3,38%
CEMAT	-7,65%	24,74%	-7,55%	11,25%	17,57%	1,56%
CEMIG	-0,78%	-15,80%	-3,53%	-2,40%	6,30%	-14,01%
COELBA	7,78%	9,38%	-3,50%	5,52%	17,22%	1,10%
COELCE	8,18%	-1,04%	-2,84%	-5,28%	7,65%	6,49%
COSERN	9,22%	5,97%	-11,42%	7,48%	14,86%	1,31%
CPFL – Paulista	7,60%	-1,79%	6,36%	-0,30%	6,30%	-0,21%
ELEKTRO	6,14%	2,76%	0,80%	-18,05%	11,91%	-5,12%
ELETROPAULO	4,71%	-7,21%	-5,04%	5,36%	6,18%	-0,56%
ENERSUL	21,64%	0,99%	-2,33%	7,40%	12,31%	-17,19%
ESCELSA	2,47%	-7,65%	-13,82%	15,16%	13,54%	4,74%
LIGHT	-0,94%	-5,73%	-17,77%	-2,67%	12,72%	-19,01%
PIRATININGA	12,56%	10,96%	-14,73%	-5,68%	15,83%	8,45%
RGE	-22,17%	10,81%	-2,62%	7,21%	2,48%	-0,23%

Os valores grifados (em negrito) indicam que são índices significativamente diferentes de 0,0% (zero) para um intervalo de confiança de 95%. O que representa 78% das estimativas de ganhos de produtividade analisadas.

Realizando estas mesmas análises para as estimativas de Ganho de Eficiência e de Evolução Técnica constatou-se que a maior parte dos índices obtidos não eram estatisticamente significativos. Desta forma, e também considerando que os mesmos não são individualmente considerados pela ANEEL no processo de

determinação dos ganhos de produtividade do setor de distribuição de energia, as análises subsequentes se restringirão ao Índice Malmquist.

Pelos resultados demonstrados na Tabela 20, tem-se, então, que não é possível se afirmar para 22% deles se houve ganho ou perda de produtividade, pois para um nível de significância de 5%, os intervalos de confiança destes índices continham o valor 0%.

No entanto, a fim de se chegar em um resultado sobre o ganho de produtividade das distribuidoras, propõe-se neste trabalho a seguinte aproximação: para os resultados não significativos estatisticamente, adotar-se-á o valor de 0%. Ou seja, nestes casos, serão considerados que as distribuidoras tiveram uma estagnação de produtividade.

Diante desta aproximação, os resultados passam a ser os apresentados a seguir na Tabela 21.

Tabela 21 – Estimativa dos Ganhos de Produtividade das Distribuidoras considerando o *bootstrap* com B=3.000 e a aproximação proposta

Distribuidoras	2003 / 2004	2004 / 2005	2005 / 2006	2006 / 2007	2007 / 2008	2008 / 2009
AES SUL	0.00%	-5,31%	0.00%	-1,10%	-4,50%	-3,92%
AMPLA	-7,47%	-8,36%	-6,97%	0.00%	10,58%	3,75%
BANDEIRANTE	0.00%	3,70%	-11,92%	9,26%	0.00%	0.00%
CEEE	0.00%	0.00%	4,41%	0.00%	4,09%	-14,54%
CELPE	3,44%	0.00%	-10,94%	4,89%	16,27%	2,74%
CEMAR	10,10%	22,57%	8,03%	11,27%	-5,62%	-3,38%
CEMAT	-7,65%	24,74%	-7,55%	11,25%	17,57%	1,56%
CEMIG	0.00%	-15,80%	-3,53%	-2,40%	6,30%	-14,01%
COELBA	7,78%	9,38%	-3,50%	5,52%	17,22%	0.00%
COELCE	8,18%	0.00%	-2,84%	-5,28%	7,65%	6,49%
COSERN	9,22%	5,97%	-11,42%	7,48%	14,86%	0.00%
CPFL – Paulista	7,60%	0.00%	6,36%	0.00%	6,30%	0.00%
ELEKTRO	6,14%	0.00%	0.00%	-18,05%	11,91%	0.00%
ELETROPAULO	4,71%	-7,21%	-5,04%	5,36%	6,18%	0.00%

ENERSUL	21,64%	0,99%	-2,33%	7,40%	12,31%	-17,19%
ESCELSA	2,47%	-7,65%	-13,82%	15,16%	13,54%	4,74%
LIGHT	0,00%	-5,73%	-17,77%	-2,67%	12,72%	-19,01%
PIRATININGA	12,56%	10,96%	0,00%	-5,68%	15,83%	0,00%
RGE	-22,17%	10,81%	-2,62%	7,21%	2,48%	0,00%

Os resultados são demonstrados graficamente na Figura 14, onde é possível também constatar a diferença dos valores médios resultantes desta aproximação em comparação com os valores corrigidos.

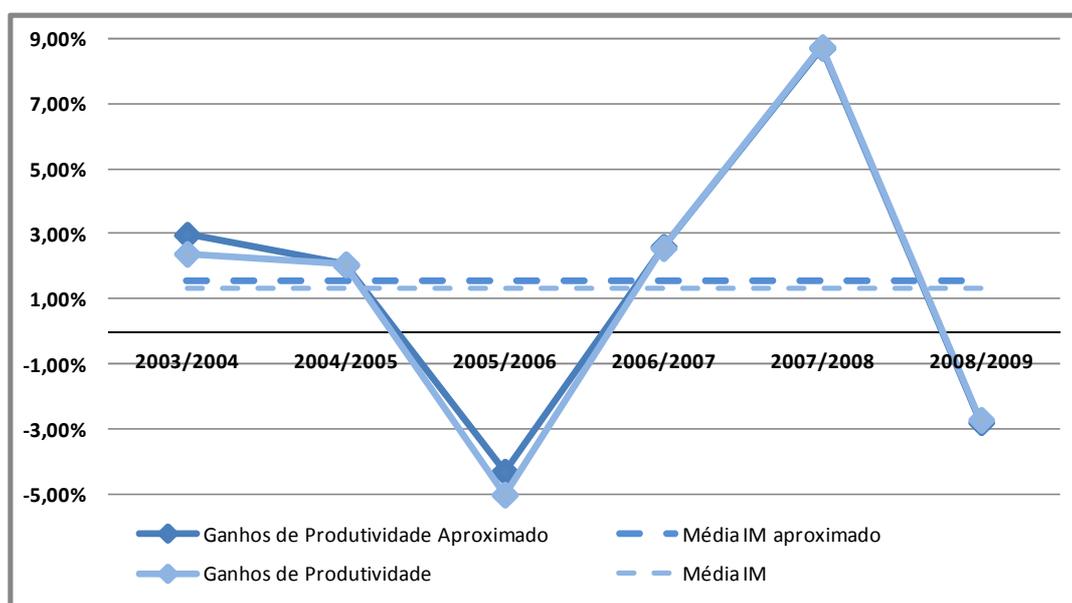


Figura 14 – Diferenças dos índices de produtividade corrigidos

Assumindo esta aproximação, tem-se como resultado uma estimativa de ganho médio de produtividade do setor de distribuição de energia elétrica brasileiro de 1,55%.

6.4 Conclusões dos Resultados

Este capítulo teve como objetivo determinar a eficiência e a produtividade das distribuidoras de energia elétrica, empregando a metodologia de DEA para medir a eficiência do setor, o Índice Malmquist para se medir a produtividade e a técnica de *bootstrap* para determinar intervalos de confiança para estas estimativas.

Assumiram-se as premissas básicas adotadas pela ANEEL nas análises realizadas, quais sejam: mesmos insumos e produtos, orientação a insumos e retornos não decrescentes de escala.

Pelas análises de eficiência foi possível observar flutuações do índice de eficiência, obtidos por meio da metodologia DEA, ao longo dos anos do período em análise. Além disso, verificou-se que as distribuidoras apresentaram uma produtividade média de 81,4%.

No entanto, por meio da técnica de *bootstrap* aplicado ao DEA, constatou-se que estes valores estavam superestimados. Corrigindo-se o viés dos índices, a eficiência média das distribuidoras reduziu-se para 65,9%. Ou seja, o potencial médio para redução de custos operacionais eficientes das distribuidoras passou de 18,6% para 34,1%.

A medição de produtividade, por meio do Índice Malmquist, demonstraram que o ganho de produtividade total do setor de distribuição de energia elétrica é de 1,57% ao longo de todo o período analisado. Além disso, pode-se observar que este ganho de produtividade é resultado de melhorias na Evolução Técnica do setor, combinado com um regresso nos respectivos Ganhos de Eficiência observados.

Com relação ao Índice Malmquist, a principal conclusão está relacionada à aplicação de *bootstrap* como um meio para se realizar inferências estatísticas dos resultados alcançados, a fim de se determinar se os mesmos são estatisticamente significativos ou não.

Neste sentido, foram estimados os intervalos de confiança dos índices obtidos a fim de se verificar se os resultados indicavam de forma robusta, se havia ocorrido um progresso ou regresso da produtividade do setor. Nos casos em que os índices não representavam informações confiáveis, propôs-se considerar que houve uma estagnação da produtividade (nem perdas e nem ganhos). Diante disto, o ganho de produtividade médio do setor de distribuição de energia elétrica brasileiro foi de 1,55% para o período entre 2003 e 2009.

7 CONCLUSÕES GERAIS

7.1 Conclusão

Em 11 de novembro de 2011, com a publicação da Resolução ANEEL N^o 457/2011, concluiu-se o processo de Audiência Pública n^o 040/2010, que definiu a metodologia e os procedimentos gerais para a realização do terceiro ciclo de revisão tarifária das distribuidoras do setor elétrico brasileiro vigorando entre os anos de 2011 a 2014.

O regulador nos processos de revisão tarifária estabelece o nível tarifário que cobre os custos associados à expansão e à operação e manutenção da rede de distribuição, e o Fator X que deve repassar aos consumidores parte dos ganhos de produtividade esperados ao longo do ciclo tarifário.

Para este novo ciclo a ANEEL alterou de forma significativa o modelo para determinação do Fator X. Saiu de uma abordagem *forward looking*, com a aplicação de FCD para uma abordagem *backward looking*, com a determinação de um índice de produtividade por meio da metodologia de PTF.

Neste aspecto, estabeleceu que o Fator X seria uma combinação dos resultados obtidos por meio da metodologia de Tornqvist e de Malmquist, sendo estes os índices de produtividade total dos fatores mais disseminados na literatura. O primeiro está baseado em procedimentos paramétricos, enquanto que o segundo em não paramétricos.

Neste trabalho, por sua vez, o foco foi exclusivamente nos ganhos de produtividades das distribuidoras oriundos da aplicação do Índice Malmquist, aplicando-se a abordagem DEA.

Para a realização das análises foram consideradas, dentre as 63 distribuidoras, apenas aquelas cujas características de Monopólio Forte eram mais preponderantes. Selecionaram-se, desta maneira, 19 distribuidoras com estas características. Apesar do número reduzido, as mesmas representam 75% do mercado consumidor brasileiro, de forma que podem ser consideradas como representativas do setor de distribuição, como um todo, para esta análise.

Foram então realizadas análises de eficiência por meio de DEA e análises de produtividade, por meio de Índice Malmquist – DEA, utilizando os mesmos insumos e produtos considerados pela ANEEL no processo de determinação do índice de produtividade das distribuidoras. Pelos resultados, conclui-se que o potencial médio para redução dos custos operacionais, numa abordagem DEA orientada a insumo, dado o grau de ineficiência determinado, seria de 18,6%, enquanto que o ganho de produtividade do setor seria de 1,57%.

No entanto, após análises de *bootstrap*, essenciais para se determinar se estes resultados são significativos ou não do ponto de vista estatístico, demonstraram que os valores de eficiência e de produtividade obtidos podem levar a conclusões não confiáveis, uma vez que os mesmos carregam valores não significativos estatisticamente.

Constatou-se que a eficiência média estava superestimada. Corrigindo-se o viés, verificou-se que, na verdade, o potencial médio para redução dos custos operacionais é de 34,1%.

Com relação à aplicação do *bootstrap* ao Índice Malmquist, verificou-se que alguns índices não poderiam ser considerados nas análises, pois não representam qualquer informação confiável, de acordo com os respectivos intervalos de confiança determinados. Para estes casos, assumiu-se o valor de

0,00%, que representa estagnação do índice, obtendo-se um valor de 1,55% para a produtividade média do setor de distribuição de energia elétrica brasileiro.

Os resultados quantitativos obtidos com as análises de *bootstrap* e DEA neste trabalho devem ser olhados com cautela visto que a variabilidade dos dados de entrada e a própria definição dos atributos das concessionárias afetam significativamente os resultados. Entende-se que este trabalho oferece uma alternativa de pensamento quanto à fórmula proposta pela ANEEL neste terceiro ciclo de revisão tarifária.

Diante de todo o exposto, conclui-se, portanto, que este trabalho propôs a analisar estes aspectos inseridos recentemente no setor elétrico brasileiro e explorar a importância das análises estatísticas dos resultados obtidos a fim de verificar se os mesmos são significativos ou não, a ponto de se definir os ganhos de produtividade do setor de distribuição de energia brasileiro. Esta análise é, importante de um lado para a garantia do equilíbrio econômico-financeiro dos contratos de concessão das distribuidoras, e de outro lado para a modicidade tarifária aos consumidores.

7.2 Trabalhos Futuros

Como temas para trabalhos futuros sugerem-se:

- Uma melhor avaliação dos retornos variáveis de escala na determinação do Índice de Malmquist;

-
- Análise média de produtividade para *clusters* de distribuidoras, a fim de reduzir o nível de incertezas nos resultados alcançados devido às grandes variações das amostras; e
 - Na análise dos resultados, quando o ganho Índice Malmquist não for estatisticamente diferente de 0%, ao invés de utilizar a aproximação proposta, aplicar uma metodologia mais robusta.

Referências Bibliográficas

Resoluções e Notas Técnicas

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Nota técnica nº. 295, de 26 de outubro de 2011. **Metodologia do cálculo do Fator X – 3CRTP**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/dspListaResultado.cfm?attAnoAud=2010&attIdeAud=462&attAnoFasAud=2011&id_area=13>

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº. 457 de 08 de novembro de 2011. **Aprova o Módulo 2 dos Procedimentos de Regulação Tarifária - PRORET, que define a metodologia e os procedimentos gerais para realização do Terceiro Ciclo de Revisões Tarifárias Periódicas das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica - 3CRTP, dentre outros dispositivos**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2011457.pdf>>

Artigos, Livros e Teses

Banker, R. D., A. Charnes, and W. W. Cooper, **Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis**, *Management Science* 30:9 (September), 1984.

Charnes A, Cooper WW, Rhodes E. **Measuring the efficiency of decision making units**. *European Journal of Operational Research*, 1978.

Coelli TJ, Rao DSP, Battese GE. **An introduction to efficiency and productivity analysis**. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 1998.

Efron, B., Tibshirani, R.J. **An Introduction to the Bootstrap**. Chapman and Hall, Inc., New York, 1993.

Fare R, Grosskopf S, Lovell CAK, Lindgren B, Roos P. **Productivity development in Swedish hospitals. A Malmquist output index approach.** In: Cooper CWW, LwinA, SeifordL, editors. Data envelopment analysis: theory, methodology and applications. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1989.

Fried, H., Lovell, C. A. K. and Schmidt, S. S., **The Measurement of Productivity Efficiency and Productivity Growth**, Oxford University Press, 2008.

Jamasb, T., Pollitt, M. **Benchmarking and regulation: international electricity experience.** Utilities Policy 9 (3), 2001.

Granderson, G., Linvill, C. **Parametric and Nonparametric approaches to benchmarking the regulated firm** . Journal of Productivity Analysis, Volume 12, 1999.

Grifell-Tatje, E., and Lovell, C. A. K. **A Note on the Malmquist Productivity Index**, *Economics Letters* 47:2 (February), 1995.

Jamasb, T., Pollitt, M. **International benchmarking and regulation: an application to European electricity distribution utilities.** Energy Policy 31, 2003.

Kinnunen, K. **Pricing of electricity distribution: an empirical efficiency study in Finland, Norway and Sweden**, Utilities Policy 13, 2004.

Kneip, A., L. Simar, and P.W.Wilson. **Asymptotics for DEA estimators in nonparametric frontier models**, Discussion Paper n°. 0317, Institut de Statistique, Universite Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, 2004.

Shephard, R.W. **Theory of Cost and Production Functions.** Princeton University Press, Princeton, NJ, 1970.

Simar, L., Wilson, P.W. **Sensitivity analysis of efficiency scores: How to bootstrap in nonparametric frontier models.** Management Science 44, 1998.

Simar, L., Wilson, P.W. **Some problems with the Ferrier/Hirschberg bootstrap idea**, Journal of Productivity Analysis, 1999a.

Simar L, Wilson PW. **Estimating and bootstrapping Malmquist indices.** European Journal of Operational Research, 1999b.

ANEXO 1 – BASE DE DADOS DAS DISTRIBUIDORAS UTILIZADA NO TRABALHO

DISTRIBUIDORAS	ANO	OPEX	REDE	MERCADO AT	MERCADO MT	MERCADO BT	CONSUMIDORES
AES SUL	2003	160.142.370	63.547	2.274.016	2.580.984	2.786.219	995.650
AES SUL	2004	164.174.511	65.764	1.485.827	2.888.026	2.840.173	1.022.899
AES SUL	2005	173.892.768	67.810	1.122.639	2.994.877	2.953.643	1.046.499
AES SUL	2006	177.695.500	70.728	1.055.935	3.089.788	3.014.285	1.071.900
AES SUL	2007	186.027.353	72.704	1.043.404	3.137.420	3.169.728	1.100.115
AES SUL	2008	201.982.438	74.705	1.169.314	3.313.539	3.256.893	1.128.252
AES SUL	2009	210.034.697	76.133	1.073.193	3.157.042	3.386.225	1.150.518
AMPLA	2003	336.562.081	42.654	1.319.970	1.855.160	4.169.391	1.948.127
AMPLA	2004	377.318.796	44.113	1.510.429	1.942.715	4.315.411	2.036.052
AMPLA	2005	425.702.733	45.264	1.878.349	2.118.568	4.473.147	2.120.262
AMPLA	2006	470.981.117	47.207	2.104.043	2.206.013	4.745.417	2.150.376
AMPLA	2007	484.779.623	48.709	1.753.475	2.313.802	5.041.214	2.218.679
AMPLA	2008	451.144.692	50.231	1.791.857	2.329.603	5.150.107	2.351.251
AMPLA	2009	446.854.953	51.050	1.724.413	2.374.692	5.407.857	2.365.558
BANDEIRANTE	2003	257.767.891	25.596	4.611.522	3.062.226	3.360.206	1.243.346
BANDEIRANTE	2004	286.307.928	25.657	5.034.275	3.482.896	3.547.737	1.272.668
BANDEIRANTE	2005	279.031.091	25.890	5.175.638	3.514.402	3.526.547	1.283.446
BANDEIRANTE	2006	325.626.257	26.814	5.134.621	3.761.139	3.849.557	1.364.735
BANDEIRANTE	2007	301.980.713	27.018	5.188.941	3.996.002	4.001.582	1.401.444
BANDEIRANTE	2008	303.910.899	27.216	5.195.342	4.239.295	4.227.189	1.438.804
BANDEIRANTE	2009	279.779.539	27.496	4.202.725	4.067.018	4.439.061	1.482.518
CEEE	2003	308.140.363	45.336	796.002	1.990.567	3.383.947	1.282.035
CEEE	2004	314.641.301	49.856	834.938	2.104.456	3.394.373	1.307.291
CEEE	2005	322.304.526	54.077	838.460	2.245.109	3.480.439	1.330.490
CEEE	2006	315.458.540	58.320	922.606	2.259.420	3.531.045	1.355.105
CEEE	2007	333.450.815	62.545	1.011.239	2.337.151	3.730.749	1.383.114
CEEE	2008	328.133.511	66.714	1.084.148	2.436.930	3.791.103	1.410.821
CEEE	2009	391.288.329	71.892	930.217	2.415.466	3.932.246	1.438.072
CELPE	2003	331.707.336	97.212	1.034.789	2.356.020	4.240.311	2.335.152
CELPE	2004	322.912.776	100.005	795.312	2.425.822	4.171.732	2.364.115
CELPE	2005	341.803.029	104.034	1.164.230	2.569.746	4.527.656	2.444.743
CELPE	2006	394.077.158	109.807	1.266.697	2.713.974	4.648.486	2.539.830

CELPE	2007	393.969.448	114.774	1.427.829	2.840.653	4.857.287	2.678.068
CELPE	2008	346.057.533	118.392	1.561.801	2.908.729	5.110.916	2.818.524
CELPE	2009	356.893.145	120.428	1.537.698	2.951.990	5.511.872	2.994.259
CEMAR	2003	194.987.036	44.357	131.536	616.452	1.759.546	1.119.136
CEMAR	2004	191.941.793	52.640	120.386	656.452	1.808.387	1.164.576
CEMAR	2005	165.723.874	60.279	154.132	643.442	1.986.113	1.254.413
CEMAR	2006	160.982.506	63.113	122.548	648.732	2.121.830	1.348.912
CEMAR	2007	160.169.078	74.094	135.322	741.728	2.344.222	1.437.832
CEMAR	2008	182.015.115	79.947	143.323	735.819	2.472.721	1.535.236
CEMAR	2009	210.814.355	89.929	161.673	699.197	2.710.847	1.687.939
CEMAT	2003	229.562.509	40.550	248.080	1.231.581	2.185.392	706.456
CEMAT	2004	260.359.780	43.982	360.361	1.399.643	2.292.547	750.402
CEMAT	2005	227.159.686	60.775	389.012	1.468.255	2.473.588	791.593
CEMAT	2006	261.552.603	67.136	384.034	1.447.730	2.531.658	827.675
CEMAT	2007	267.277.521	78.206	497.626	1.643.439	2.703.021	875.350
CEMAT	2008	262.380.390	93.831	580.169	1.750.595	2.926.731	940.021
CEMAT	2009	291.621.297	106.112	668.260	1.770.600	3.131.527	992.365
CEMIG	2003	1.338.791.181	373.894	17.686.635	6.411.916	12.285.108	5.744.213
CEMIG	2004	1.439.112.916	382.026	19.923.041	6.806.644	12.419.091	5.874.993
CEMIG	2005	1.519.707.593	393.938	14.771.359	7.183.158	12.764.629	5.999.467
CEMIG	2006	1.683.127.556	409.847	16.543.231	7.344.426	12.735.201	6.240.029
CEMIG	2007	1.797.188.758	433.858	16.918.424	8.039.383	13.167.748	6.439.993
CEMIG	2008	1.723.315.365	455.440	16.783.726	8.446.339	14.223.433	6.690.189
CEMIG	2009	1.869.287.128	460.219	14.798.704	7.994.091	14.684.007	6.832.546
COELBA	2003	461.094.832	128.742	1.630.033	3.180.863	5.368.507	3.342.652
COELBA	2004	445.015.869	143.246	1.794.798	3.358.111	5.548.668	3.459.314
COELBA	2005	428.093.792	153.188	2.017.793	3.600.989	5.920.925	3.652.987
COELBA	2006	477.740.387	169.646	2.141.705	3.693.663	6.245.117	3.913.780
COELBA	2007	484.274.024	187.114	2.155.646	3.906.350	6.766.803	4.174.569
COELBA	2008	426.493.703	201.862	2.473.733	3.997.794	7.213.392	4.407.561
COELBA	2009	444.756.767	215.001	2.368.182	4.046.906	7.871.669	4.622.046
COELCE	2003	284.077.808	78.278	916.104	1.568.200	3.352.567	2.123.849
COELCE	2004	274.973.503	85.311	1.137.511	1.662.453	3.480.732	2.230.282
COELCE	2005	292.671.814	94.627	1.246.219	1.763.895	3.737.233	2.325.686
COELCE	2006	311.878.152	95.997	1.204.166	1.848.317	3.845.583	2.416.184
COELCE	2007	341.736.951	106.140	1.290.066	1.946.315	4.125.709	2.490.241
COELCE	2008	338.130.577	114.974	1.227.833	2.067.273	4.381.842	2.683.269
COELCE	2009	325.234.143	120.300	1.190.091	2.153.470	4.585.651	2.744.830

COSERN	2003	123.761.548	32.471	586.365	932.165	1.498.042	789.339
COSERN	2004	116.298.127	32.803	680.591	1.004.428	1.526.686	816.699
COSERN	2005	116.228.518	34.053	751.317	1.098.601	1.659.262	857.662
COSERN	2006	139.063.147	37.049	837.024	1.119.528	1.779.630	913.486
COSERN	2007	137.560.779	40.066	917.004	1.139.964	1.934.759	963.493
COSERN	2008	120.860.546	41.722	846.161	1.185.779	2.048.940	1.006.818
COSERN	2009	125.143.623	43.272	809.900	1.134.471	2.186.265	1.075.590
CPFLPAULISTA	2003	481.200.220	77.739	3.840.129	7.436.554	8.470.147	3.027.991
CPFLPAULISTA	2004	462.859.481	80.013	4.199.551	8.043.595	8.782.078	3.093.497
CPFLPAULISTA	2005	494.308.913	81.256	4.754.809	8.123.667	9.317.669	3.172.500
CPFLPAULISTA	2006	479.729.000	83.770	5.175.753	8.141.749	9.748.151	3.250.301
CPFLPAULISTA	2007	507.369.707	86.817	5.564.601	8.496.570	10.358.427	3.335.015
CPFLPAULISTA	2008	494.402.193	89.020	5.612.363	8.814.195	10.861.109	3.427.898
CPFLPAULISTA	2009	505.472.807	89.879	5.356.856	8.562.395	11.348.329	3.502.793
ELEKTRO	2003	370.132.830	95.306	2.534.920	3.632.526	4.782.944	1.819.607
ELEKTRO	2004	365.541.638	96.773	2.874.197	3.925.112	4.925.865	1.862.598
ELEKTRO	2005	404.037.058	98.700	2.976.941	4.026.298	5.149.150	1.904.639
ELEKTRO	2006	438.059.809	101.211	3.121.591	4.200.931	5.311.542	1.954.422
ELEKTRO	2007	430.898.887	103.791	3.299.358	4.426.328	5.563.877	2.005.109
ELEKTRO	2008	418.142.558	105.825	3.438.534	4.537.818	5.840.541	2.067.357
ELEKTRO	2009	421.453.770	107.116	3.239.453	4.413.700	6.111.450	2.123.670
ELETROPAULO	2003	1.330.936.637	39.393	5.512.020	10.885.750	17.248.084	5.056.795
ELETROPAULO	2004	1.071.537.146	41.778	6.026.020	11.467.257	17.714.492	5.147.420
ELETROPAULO	2005	1.105.434.547	42.334	6.217.280	12.018.158	18.455.400	5.300.106
ELETROPAULO	2006	1.186.064.488	44.059	6.402.830	12.557.526	19.354.243	5.468.760
ELETROPAULO	2007	1.153.511.506	44.530	6.541.864	13.137.788	20.338.111	5.651.915
ELETROPAULO	2008	1.061.472.381	44.913	6.618.529	13.492.795	21.365.906	5.830.961
ELETROPAULO	2009	1.267.776.861	45.213	6.126.186	13.192.801	21.810.717	5.987.873
ENERSUL	2003	138.863.830	38.255	252.265	915.411	1.664.641	620.344
ENERSUL	2004	146.154.389	42.495	259.224	987.967	1.767.493	645.904
ENERSUL	2005	170.156.080	47.453	248.016	1.056.300	1.798.155	664.182
ENERSUL	2006	217.773.025	54.076	252.965	1.071.503	1.796.789	695.132
ENERSUL	2007	226.427.166	66.681	260.944	1.155.484	1.841.587	716.958
ENERSUL	2008	208.111.687	70.894	276.783	1.224.073	1.899.470	748.000
ENERSUL	2009	208.022.495	74.504	203.394	1.187.074	2.095.572	784.816
ESCELSA	2003	177.648.858	46.080	3.536.829	1.297.547	2.322.835	972.420
ESCELSA	2004	178.908.985	47.460	3.458.082	1.371.682	2.304.112	988.621
ESCELSA	2005	200.950.396	50.113	3.673.928	1.457.341	2.502.406	1.039.414

ESCELSA	2006	245.600.296	51.827	3.812.706	1.576.208	2.652.128	1.064.746
ESCELSA	2007	260.648.217	53.364	3.933.639	1.659.151	2.895.533	1.100.902
ESCELSA	2008	232.401.377	55.290	3.984.219	1.675.652	3.088.456	1.150.869
ESCELSA	2009	237.059.063	56.960	3.014.387	1.595.752	3.287.830	1.185.432
LIGHT	2003	674.359.473	55.015	6.007.383	5.502.812	9.519.240	3.368.831
LIGHT	2004	634.153.001	55.672	7.850.526	5.633.138	9.981.621	3.434.928
LIGHT	2005	609.734.790	55.927	8.339.374	5.880.728	10.926.272	3.446.492
LIGHT	2006	662.725.868	56.409	6.161.685	5.843.534	10.980.010	3.458.097
LIGHT	2007	715.775.158	56.923	6.264.548	6.012.074	11.240.002	3.483.322
LIGHT	2008	613.048.347	57.588	6.498.481	5.978.582	11.380.370	3.517.004
LIGHT	2009	572.753.299	58.074	5.020.461	5.941.069	12.109.866	3.640.182
PIRATININGA	2003	206.331.232	20.008	5.534.874	3.219.515	3.278.525	1.151.780
PIRATININGA	2004	206.256.428	20.506	6.017.144	3.377.884	3.299.422	1.193.663
PIRATININGA	2005	198.673.031	20.677	5.757.228	3.609.685	3.537.519	1.216.243
PIRATININGA	2006	199.620.969	21.096	5.718.343	3.822.035	3.695.718	1.250.094
PIRATININGA	2007	217.393.928	21.705	4.794.538	4.108.389	3.900.160	1.286.491
PIRATININGA	2008	197.566.475	21.713	4.820.436	4.358.290	4.138.306	1.328.159
PIRATININGA	2009	199.249.337	22.236	4.424.429	4.238.197	4.368.755	1.367.488
RGE	2003	157.721.787	75.688	654.991	2.942.034	2.776.296	1.052.275
RGE	2004	201.267.646	76.367	717.374	3.222.202	2.828.468	1.072.280
RGE	2005	182.673.178	78.155	737.930	3.247.261	2.887.865	1.094.642
RGE	2006	193.071.233	80.665	831.823	3.300.164	2.942.424	1.122.842
RGE	2007	186.232.342	82.664	977.561	3.519.355	3.153.349	1.157.865
RGE	2008	190.939.904	83.983	974.201	3.808.029	3.284.568	1.192.867
RGE	2009	189.905.561	84.997	869.046	3.676.688	3.447.369	1.226.079
