

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Demanda de energia na indústria brasileira: efeitos da eficiência energética

Marlon Bruno Salazar

Tese apresentada para obtenção de Título de Doutor em
Ciências. Área de Concentração: Economia Aplicada

**Piracicaba
2012**

Marlon Bruno Salazar
Bacharel em Ciências Econômicas

Demanda de energia na indústria brasileira: efeitos da eficiência energética
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **ROBERTO ARRUDA DE SOUZA LIMA**

Tese apresentada para obtenção de Título de Doutor em
Ciências. Área de Concentração: Economia Aplicada

Piracicaba
2012

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Salazar, Marlon Bruno

Demanda de energia na indústria brasileira: efeitos da eficiência energética / Marlon Bruno Salazar. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.

93 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Demanda energética 2. Energia - Eficiência 3. Indústria - Brasil I. Título

CDD 338
S161d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICO

Aos meus pais, que muito me apoiaram em todos os momentos de minha vida e a minha esposa Joyce que nos quase três anos de casados me fez pensar como vivi tanto tempo sem ela do meu lado.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por me mostrar sempre o melhor caminho a seguir e colocar em minha vida pessoas maravilhosas que sempre pude contar.

Aos meus pais e irmãos pelo carinho e a certeza na vida que nada é mais importante que a família.

Agradeço também a minha esposa Joyce pelo amor despendido, sua atenção e apoio nos momentos mais críticos e difíceis dessa nossa caminhada.

Ao meu orientador, Roberto, que desde a nossa primeira conversa confiou em mim, principalmente quando me ausentei de Piracicaba para poder casar e começar a trabalhar.

Aos amigos de Piracicaba, em especial meu padrinho Jerônimo, Inocêncio, Bruno, Neto, Gilberto Fraga, Gilberto Fernandes e Maria.

Aos professores e funcionários do Departamento de Economia da ESALQ/USP, em especial a Maielli pelas incontáveis vezes que me orientou da forma mais correta possível.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para minha formação e a pessoa que me tornei.

Os que crêem que a culpa de nossos males está em nossas estrelas e não em nós mesmos ficam perdidos quando as nuvens encobrem o céu.

Roberto Campos

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Considerações Iniciais	19
1.2 Problema e sua Importância	25
1.3 Objetivos	28
1.3.1 Objetivo Geral	28
1.3.2 Objetivos Específicos	28
2 REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1 Teoria dos Custos	29
2.1.1 Custos no Curto Prazo	30
2.1.2 Custo no Longo Prazo	32
2.2 Modelos Empíricos de Demanda de Energia	34
3 REFERENCIAL ANALÍTICO	39
3.1 Decomposição da Intensidade Energética	39
3.1.1 Métodos de Decomposição	40
3.1.2 Atribuições desejáveis para os Métodos de Decomposição	49
3.1.3 Comparação entre Métodos de Decomposição	52
3.2 Modelo de Cointegração	54
3.2.1 Estacionariedade	54
3.2.2 Teste de Raiz Unitária	55
3.2.3 Co-integração de Johansen	57
3.2.4 Modelo Auto-Regressivo Vetorial (VAR)	59
3.3 Fonte de Dados	60
4 RESULTADOS	63
4.1 Decomposição do Consumo de Energia e Intensidade Energética	63
4.1.1 Decomposição do Consumo de Energia	63
4.1.2 Decomposição da Intensidade Energética	68
4.2 Função de Demanda de Energia na Indústria Brasileira	72
4.3 Determinantes da Intensidade Energética na Indústria	78
5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
REFERÊNCIAS	89

RESUMO

Demanda de energia na indústria brasileira: efeitos da eficiência energética

A conservação de energia, mais precisamente a eficiência energética, vem ganhando importância nos últimos anos no Brasil e no mundo em função dos impactos ambientais que o uso intensivo de energia gera ao meio ambiente e pelo fato de a oferta de energia, principalmente as derivadas de fontes não renováveis, estar se tornando cada vez mais escassa. Estudos que abordam os impactos que os ganhos de eficiência podem gerar em termos de custos e na conservação de energia e, por conseguinte, na diminuição dos efeitos da atividade industrial no meio ambiente vem ganhando importância. Este trabalho teve como motivação principal determinar o impacto da Eficiência Energética na demanda de energia da indústria brasileira. Para isso utilizaram-se duas metodologias complementares para dissertar a respeito do tema. Primeiramente, a intensidade energética foi decomposta em dois efeitos distintos, Efeito Intensidade e Efeito Estrutural. Os resultados encontrados sugerem que o Efeito Intensidade foi o principal responsável pela perda de Eficiência no consumo de energia pela indústria. Como o Efeito Intensidade é uma importante *proxy* para a Eficiência Energética, buscou-se determinar o impacto desta no consumo de energia pela indústria brasileira. Outras variáveis também foram utilizadas para compor a função de demanda de energia, como PIB industrial, preços médios ponderados das diferentes fontes de energia e o nível de salários pagos na indústria. Os resultados encontrados sugerem que um aumento de 1% no Efeito Intensidade tem impacto de 0,297% no consumo de energia industrial. Procurou-se também neste trabalho buscar os determinantes da Eficiência Energética. Para tal, utilizou-se como variáveis explicativas a Formação Líquida de Capital Fixo como *proxy* dos investimentos feitos pela indústria, a Utilização da Capacidade Instalada como um indicador de excesso ou de subutilização do parque industrial e por fim a Taxa de Câmbio Real, dado que a maior parte dos setores energo-intensivos industriais também se caracterizam pela forte abertura ao comércio exterior. Os resultados encontrados sugerem que o aumento na Utilização da Capacidade Instalada implica na perda de Eficiência Energética. Por outro lado, aumento na Formação Líquida de Capital Fixo contribui para a redução do Efeito Intensidade que implica aumento na utilização eficiente de energia. Concluiu-se que o aumento da Taxa de Investimento na economia, além de aumentar a Eficiência Energética na indústria, também é responsável por reduzir o consumo de energia e assim beneficiar o próprio setor industrial através da redução de custos como também toda a sociedade através dos benefícios que a redução da produção de energia pode gerar no meio ambiente e na poupança de recursos não renováveis.

Palavras-chave: Efeito intensidade; Eficiência energética; Demanda de energia industrial

ABSTRACT

Energy demand of brazilian industry: effects of energy efficiency

The conservation of energy, specifically energy efficiency is gaining importance lately in Brazil and the world due environmental impacts that intensive use of energy generates to the environment and for the fact that the supply of energy, mainly derived from non-renewable sources, is becoming increasingly scarce. Studies which approach the impacts that efficiency gains can generate in terms of cost and energy conservation and, therefore, to reduce the effects of industrial activity on the environment are gaining importance. This work had as its main motivation to determine the impact of energy efficiency in energy demand of Brazilian industry. For this we used two complementary methodologies to discourse on the subject. First, the energy intensity was decomposed into two distinct effects: Intensity effect and Structural effect. The results suggest that the Intensity effect was mainly responsible for the loss of efficiency in energy used by industry. As the Intensity Effect is an important proxy for the Energy Efficiency, we attempted to determine the impact of energy consumption in Brazilian industry. Other variables were also used to compose the function of energy demand, such as industrial GDP, weighted average prices of different energy sources and the level of salaries paid in the industry. The results suggest that a 1% increase in the intensity effect has an impact of 0.297% in industrial energy consumption. We also sought to pursue the determinants of Energy Efficiency. For this purpose, we used as explanatory variables the Net Fixed Capital Formation as a proxy of the investment made by the industry, the Use of Installed Capacity as an indicator of excess or industrial underused and finally the Real Exchange Rate, as most energy-intensive industrial sectors are also characterized by a strong opening to foreign trade. The results suggest that increased use of installed capacity implies the loss of energy efficiency. On the other hand, increase in Net Fixed Capital Formation contributes to the reduction of the Intensity Effect which implies an increase in the efficient use of energy. It was concluded that the increased Rate of Investment in the economy, besides increasing the Energy Efficiency in industry, is also responsible for reducing energy consumption and thus benefit the industrial sector itself by reducing costs as well as the whole society through the benefits that the reduction of energy production can have on the environment and saving non-renewable resources.

Keywords: Intensity effect; Energy efficiency; Industrial energy demand

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de Energia Primária por Fonte.....	20
Figura 2 – Consumo Energético por Setor.	21
Figura 3.a – Consumo de Energia na Indústria por Setor.....	23
Figura 3.b – Consumo de Energia na Indústria por Setor.	23
Figura 4 – Intensidade Energética na Indústria. UNIDADE: tep/10 ⁶ US\$.	24
Figura 5 - Efeito principal e contribuições dos fatores x e y.....	43
Figura 6 – Decomposição do Consumo de Energia na Indústria em tep entre 1970 – 2008. Fonte: Dados da pesquisa.	64
Figura 8 – Decomposição da Intensidade Energética na Indústria em tep/milhões de dólares, entre 1970 – 2008. Fonte: Dados da Pesquisa.	69
Figura 9 – Decomposição da Intensidade Energética na Indústria em índice, entre 1970 – 2008. Fonte: Dados da Pesquisa.	70
Figura 10 – Intensidade Energética nos principais setores Energo-Intensivos industriais, entre 1970 e 2008. Fonte de dados: BEN (2008).....	71
Figura 11 – Taxa de Investimento em proporção do PIB e Taxa de Utilização da Capacidade Instalada na Indústria. Fonte: IPEADATA.....	79
Figura 12 – Relação entre Taxa de Investimento e Índice do Efeito Intensidade. Fonte: IBGE e Dados da pesquisa.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de Energia no Setor Industrial. Participação por fonte, em %	21
Tabela 2 – Teste de Fundamentação Teórica para índices de Decomposição	52
Tabela 3a – Teste de Raiz Unitária ADF para as séries Consumo de Energia Industrial, PIB Industrial, Preços ponderados de energia, Salários na indústria e Intensidade Energética	73
Tabela 3b – Teste de Raiz Unitária DF-GLS para as séries Consumo de Energia Industrial, PIB Industrial, Preços ponderados de energia, Salários na indústria e Intensidade Energética	74
Tabela 4 – Estrutura de defasagem do modelo VAR(p)	75
Tabela 5 – Teste de Cointegração entre as séries: Consumo de Energia Industrial, PIB Industrial, Preços ponderados de energia, Salários na indústria e Intensidade Energética, assumindo tendência determinística linear, sem nenhum lag	75
Tabela 6 – Determinantes da Demanda de Energia pela Indústria	76
Tabela 7 – Coeficiente de Abertura Líquida setores e períodos selecionados	80
Tabela 8a – Teste de Raiz Unitária ADF para as séries Capacidade Instalada da Indústria, Formação Líquida de Capital Fixo, Intensidade Energética e Taxa de Câmbio Real	81
Tabela 8b – Teste de Raiz Unitária GLS-DF para as séries Capacidade Instalada da Indústria, Formação Líquida de Capital Fixo, Intensidade Energética e Taxa de Câmbio Real	82
Tabela 9 - Estrutura de defasagem do modelo VAR(p)	83
Tabela 10 – Teste de Cointegração (Traço) entre as séries: Intensidade Energética, Capacidade Instalada na Indústria, Formação Líquida de Capital Fixo e Taxa de Câmbio, não utilizando tendência e lag	83
Tabela 11 – Determinantes da Intensidade Energética na Indústria	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e social de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade nos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis (que demandam combustíveis), eletrodomésticos e eletroeletrônicos (que exigem acesso à rede elétrica e pressionam o consumo de energia elétrica) (ANEEL, 2008).

O desenvolvimento econômico e social é um dos principais fatores que explicam o aumento de consumo de energia. Contudo outros fatores são importantes para a análise, entre eles se destaca o crescimento da população – indicador obtido tanto pela comparação entre as taxas de natalidade e mortalidade quanto pela medição de fluxos migratórios. No Brasil, entre 2000 e 2005, a taxa de crescimento populacional teve uma tendência de queda relativa, registrando variação média anual de 1,46% (IBGE, 2010).

Dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2008) e do Ministério de Minas e Energia, mostram que no período de 1970 a 2007, de maneira geral, a tendência tem sido de expansão do consumo global de energia (o que abrange derivados de petróleo, gás natural, energia elétrica, entre outros). De 1990 a 2007, o crescimento acumulado foi de 69%, com o consumo total passando de 127,596 milhões de tep¹ para 215,565 milhões de tep.

Os derivados de petróleo são as principais fontes energéticas utilizadas no país (Figura 1), comportamento esse verificado ao longo dos últimos anos. Se somados óleo diesel, gasolina e GLP (gás liquefeito de petróleo), o consumo atingiu 76,449 milhões de tep, diante de um consumo total de 201,409 milhões de tep. Valor, portanto, superior, ao da energia elétrica, que atingiu 35,443 milhões de tep (EPE, 2009).

¹ Tonelada Equivalente de Petróleo, 1 tep = 41,85 GJ.

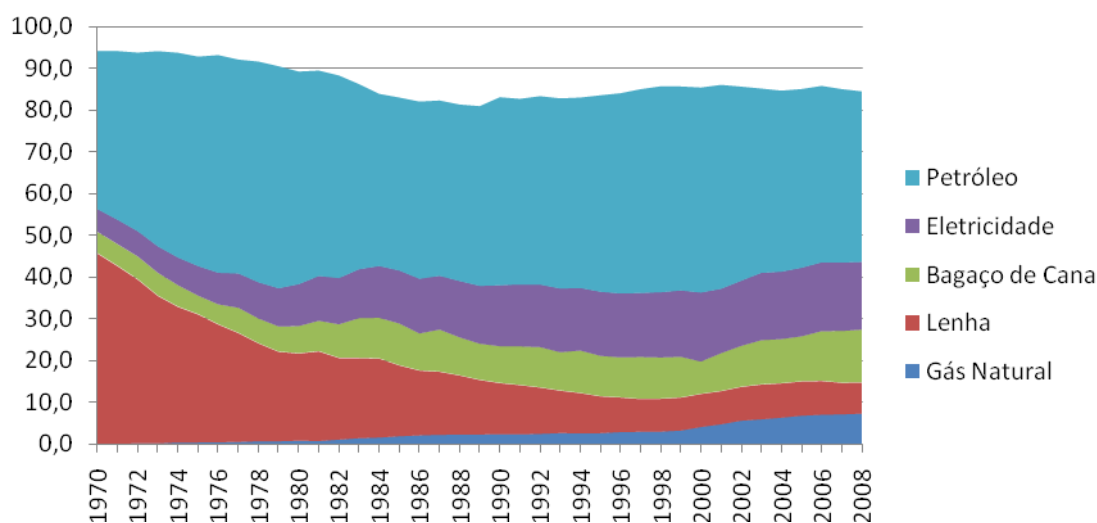


Figura 1 – Consumo de Energia Primária por Fonte
Fonte: EPE, 2009. Adaptado pelo autor.

A Figura 1 mostra participação relativamente constante dos produtos derivados de petróleo na matriz energética brasileira, enquanto que Eletricidade, Bagaço de Cana e Gás Natural vêm ganhando participação ao longo dos últimos 30 anos. Lenha é a fonte energética que mais perdeu participação ao longo do tempo, em 1970 esta fonte detinha mais de 40% da matriz brasileira, em 2008 a participação se reduziu a 7,4%.

Entre os setores que mais consomem energia destaca-se a Indústria. O setor industrial vem aumentando sua participação no consumo energético brasileiro, passando de uma participação de 27,7% em 1970 para 36,4% em 2008 (Figura 2). Os setores de transportes e residencial também apresentam expressivo consumo, contudo este último vem perdendo participação na matriz energética ao longo do período analisado, participação esta que já chegou a 35,5% em 1970 e em 2008 não ultrapassou os 10%.

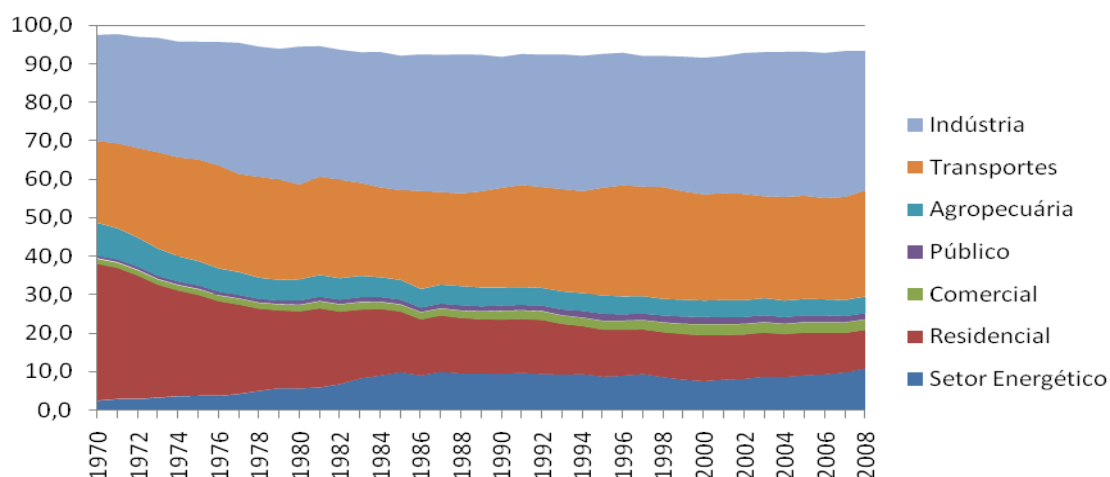


Figura 2 – Consumo Energético por Setor

Fonte: EPE, 2009. Adaptado pelo autor.

Outro importante setor a ganhar participação na matriz energética brasileira é o setor Energético, principal responsável pela produção térmica de energia elétrica, viu sua participação na matriz de consumo de energia passar de 2,5% em 1970 para 10,8% em 2008. O consumo de energia para produção de eletricidade nas usinas termoeletricas saltou de 200 mil/tep para 3082 mil/tep, o que representa um crescimento de mais de 15 vezes.

Tendo em vista que a Indústria, mesmo perdendo participação no PIB brasileiro, como pode ser constatada por dados do IBGE (2008), passando de 35% do PIB em 1970 para 25% em 2008, aumentou o consumo relativo de energia. Esse maior consumo pode ser dividido por fontes, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo de Energia no Setor Industrial. Participação por fonte, em %

Fontes de Energia	1970	1980	1990	2000	2008
GÁS NATURAL	0,0	0,9	3,2	6,3	10,3
CARVÃO MINERAL	0,4	1,3	2,3	4,6	4,7
LENHA	24,0	9,3	12,4	8,7	7,9
BAGAÇO DE CANA	17,8	12,8	10,5	12,8	18,7
OUTRAS FONTES PRIM. RENOVÁVEIS	0,8	2,0	3,4	4,9	6,4
ÓLEO COMBUSTÍVEL	30,3	34,7	15,6	11,6	4,8
GÁS DE COQUERIA	1,0	1,3	2,0	1,5	1,3
COQUE DE CARVÃO MINERAL	6,8	8,5	11,8	10,6	8,1
ELETRICIDADE	9,8	15,7	22,2	20,6	20,6
CARVÃO VEGETAL	6,4	9,0	12,5	7,1	6,8
OUTRAS	2,7	4,5	4,1	11,2	10,4

Fonte: BEN (2009).

Destaca-se o aumento da participação do Gás Natural e Eletricidade. O Gás Natural, que em 1970 não tinha expressividade no consumo da Indústria, teve sua participação aumentada consideravelmente nos últimos anos, principalmente após a importação de Gás proveniente da Bolívia pela Petrobras, por meio da GASBOL, gasoduto que liga a Bolívia ao Brasil.

A eletricidade foi a fonte de energia que mais ganhou participação na matriz de consumo da Indústria, mais que dobrando sua participação no período de 1970 a 2008. De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007c) o consumo de energia elétrica pela Indústria deve crescer a uma taxa de 3,7% ao ano até 2030.

A principal perda de participação no consumo de energia pelo setor industrial ficou com a Lenha e o Óleo Combustível. Em 1970, Lenha e Óleo detinham juntos mais de 50% das fontes de energia da indústria; já em 2008, as duas fontes não somavam 13%. Praticamente não houve alteração com relação a participação de fontes renováveis e não-renováveis na Indústria. Em 1970, 58,5% da matriz de consumo provinham de fontes renováveis, percentual esse que se manteve praticamente igual em 2008, ou seja, 60,5%.

Com relação aos setores industriais, estes podem ser divididos em energia-intensivos e não energia-intensivos. Garcia et al. (2005) definem a indústria energia-intensiva como aquela composta de segmentos industriais cujo consumo individual de energia supera 2% do total consumido pelo setor industrial, ou pelos setores cujas razões “despesa com energia/custo operacional” ou “despesa com energia/valor adicionado” superam 7,5%.

Por outro lado, EPE (2007a) define a indústria energia-intensiva com relação a três diferentes critérios, intensidade energética, consumo específico de energia e participação do segmento no consumo total de energia.

Por intensidade energética pode-se entender como razão entre o consumo agregado de energia e o Produto Interno Bruto. Pelo critério anteriormente citado, em geral, setores industriais energia-intensivos são aqueles que possuem alta intensidade energética. Consumo específico de energia entende-se como razão entre o consumo agregado de energia e a quantidade física de produto no setor.

EPE (2007b) destaca que levando em consideração os três critérios, pode-se definir como setores energia-intensivos em energia: alimentos e bebidas, papel e celulose, ferro-gusa e aço, ferro-ligas, mineração e pelotização, metais não-ferrosos e outros da metalurgia e química. Cimento, cerâmica, têxtil e outras indústrias foram classificados no grupo demais indústrias.

As Figuras 3.a e 3.b destacam a participação dos setores energo-intensivos na matriz de consumo energético da Indústria nos anos de 1970 e 2008. Em 1970, 69% da energia consumida referiam-se a setores energo-intensivos (alimentos e bebidas, papel e celulose, ferro-gusa e aço, ferro-ligas, mineração e pelotização, metais não-ferrosos e outros da metalurgia e química). Em 2008, 80% do consumo de energia provinha dos setores energo-intensivos.

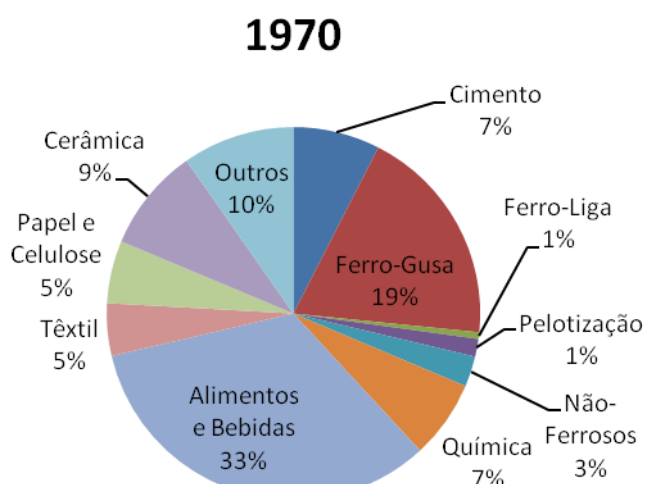


Figura 3.a – Consumo de Energia na Indústria por Setor

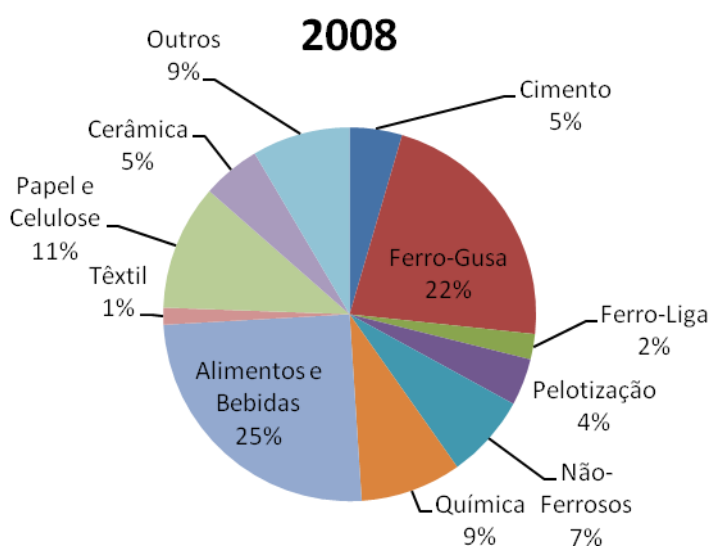


Figura 3.b – Consumo de Energia na Indústria por Setor

Adaptado pelo autor. Fonte: EPE, 2009.

Como destaca EPE (2007b), a dinâmica dos subsetores que compõem o segmento Industrial contribuiu para as modificações na estrutura de consumo de energia no período. Setores mais intensivos em energia, como os segmentos de ferro-gusa e aço, papel e celulose, não ferrosos e outros da metalurgia, e ferro-ligas apresentaram forte expansão no período.

Analisando a evolução nos últimos 30 anos, observa-se que houve uma redução da participação dos setores de alimentos e bebidas, cimento e cerâmica no consumo energético do setor industrial. Em contrapartida, os setores de ferro-gusa e aço, mineração e pelotização, papel e celulose e não ferrosos e outros metais ganharam participação.

A Figura 4 mostra a evolução da Intensidade Energética da Indústria no período 1970 a 2008. A Intensidade Energética aumentou de 1970 a 2003, diminuindo desde então para níveis próximos ao ano de 1998.

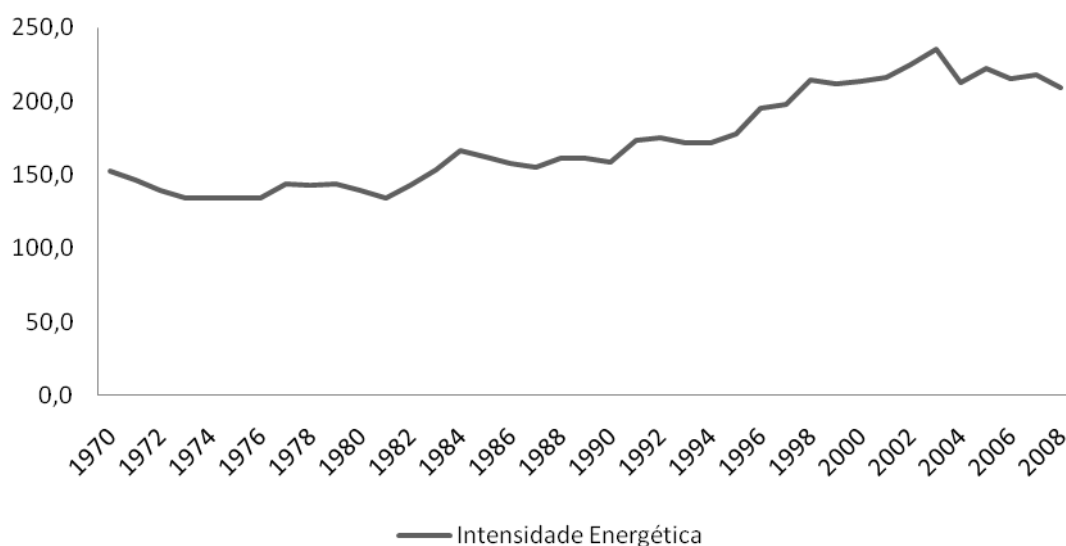


Figura 4 – Intensidade Energética na Indústria. UNIDADE: tep/10⁶ US\$²
Fonte: BEN (2008).

² Razão entre Consumo de energia e PIB.

1.2 Problema e sua Importância

Como observa Alves (2007), o conceito de eficiência energética pode ser tratado como o uso da menor quantidade de energia possível para o fornecimento de um determinado produto ou serviço. A eficiência energética pode ser medida a partir de diferentes indicadores, em função do equipamento, processo, tecnologia ou serviço estudado, mas sua unidade pode ser expressa basicamente como unidade de produto e serviço por unidade de energia.

O inverso da eficiência energética é a intensidade energética, que pode ser expressa como a quantidade de energia por unidade de produto ou serviço. No Brasil, utilizam-se principalmente os indicadores de intensidade energética para medir a eficiência.

$$\textit{Intensidade Energética} = \frac{\textit{QUANTIDADE ENERGIA}}{\textit{PRODUTO/SERVIÇO}} = \frac{\textit{Tep}}{\textit{US\$}} \quad (1.1)$$

$$\textit{Eficiência Energética} = \frac{\textit{PRODUTO/SERVIÇO}}{\textit{QUANTIDADE ENERGIA}} = \frac{\textit{US\$}}{\textit{Tep}} \quad (1.2)$$

Contudo, a construção de um serie histórica com os índices obtidos nas equações (1.1) e (1.2) pode incorporar diversas informações relevantes que devem ser decompostas nos chamados Efeito Estrutural e Efeito Intensidade³.

O Efeito Estrutural refere-se ao tamanho total do setor/segmento na demanda total de energia, o que se relaciona ao nível de atividade de cada setor/segmento de acordo com o crescimento do PIB bem como da estrutura setorial, ou seja, o Efeito Estrutura está relacionado com a relação entre setores energo-intensivos e suas respectivas participações no produto industrial.

O Efeito Intensidade é definido como o percentual de ganho relativo de eficiência ao se adotar maior participação de uma dada fonte energética mais eficiente (por exemplo, gás natural para geração de vapor em substituição ao óleo combustível) ou por substituição tecnológica, ou ainda, através de mudanças de procedimento (hábitos de uso, especificação correta de equipamentos ou de equipamentos mais eficientes, dimensionamento de sistemas, manutenção adequada, gestão energética etc.).

Diversos trabalhos nacionais e internacionais utilizaram esta metodologia para decompor a Intensidade Energética para o setor industrial. Motta e Araújo (1989) decomuseram as variações de consumo industrial de energia separadamente para energia

elétrica, óleo combustível e outros combustíveis para permitir relacionar os principais aspectos do crescimento econômico e as políticas energéticas.

Howarth, Schipper and Andersson (1993) decomuseram o consumo de energia industrial para cinco países da OECD entre os anos de 1973 a 1988, chegando à conclusão que mudanças na estrutura dos países analisados tiveram importantes impactos na relação consumo de energia/PIB, mudanças essas independentes de alterações na utilização de técnicas mais eficientes de produção e utilização de energia.

Greening et. al (1997) utilizaram seis métodos diferentes de decomposição de intensidade agregada de energia para o setor industrial de 10 países da OECD entre os anos de 1970 e 1992. Os autores chegaram à conclusão de que a maior parte da mudança na intensidade energética pode ser explicada pelo Efeito Intensidade, entretanto mudanças de produção setoriais, ou seja, Efeito Estrutural, também se mostraram importantes na determinação da Intensidade Energética.

A importância da decomposição da Intensidade Energética em Efeito Estrutural e Efeito Intensidade reside na utilização de tais índices em conjunto com outras variáveis para estimar uma função de demanda de energia para a indústria brasileira e determinar as devidas elasticidades.

Estimativas e previsões de demanda de energia são muito relevantes não só para uma melhor otimização do planejamento energético, mas também para auxiliar órgãos reguladores nas formulações de regras e políticas para este setor.

Mattos et. al (2008) argumentam que uma importante dimensão do problema envolve a gestão estratégica do suprimento de energia a longo prazo. Essa gestão vem sendo coordenada pelos órgãos governamentais de planejamento energético e agências regulatórias em parceria com as empresas fornecedoras de energia. Para que tal gestão seja eficaz, necessário se faz o uso de instrumentos adequados para a geração de previsões a longo prazo da demanda de energia.

Por outro lado, Pires, Gostkorzewicz e Giambiagi (2001) denotam que no passado o setor energético brasileiro constituiu importante vetor de desenvolvimento, contudo tende a condicionar a velocidade desse crescimento, uma vez que o ritmo de expansão da demanda vem evoluindo em patamares superiores à taxa de oferta de energia.

As funções de demanda de energia industrial tradicionais levam em consideração valor adicionado na indústria ou PIB industrial, preço da energia, estoque de capital; a Eficiência

³ Mais detalhes serão fornecidos no Capítulo 3 item 3.1.

Energética costuma ser mencionada apenas quanto se trata da Elasticidade-Renda da demanda de energia. Porém, tal método é insuficiente para revelar a real importância da Eficiência Energética na demanda de energia. Cabe, desse modo, responder a pergunta: a Intensidade Energética é uma variável importante para explicar o comportamento do consumo de energia na indústria brasileira?

Dado a importância que a conservação de energia e eficiência energética vêm ganhando nos últimos anos no Brasil e no mundo em função dos impactos ambientais que o uso intensivo de energia gera ao meio ambiente e pelo fato de a oferta de energia não acompanhar a taxa de crescimento da demanda, a completa estimação e mensuração dos impactos de ganhos de eficiência contribuem para maior previsibilidade e também para que se possa entender com maior mérito a contribuição da indústria na conservação de energia e, por conseguinte, na diminuição dos efeitos da atividade industrial no meio ambiente.

Considerando que parte da demanda por energia pela sociedade, em especial a indústria, será suprida pela construção de hidrelétricas que precisam de reservatórios para armazenagem de água ou por termoelétricas que produzem energia através da queima de algum combustível fóssil (diesel, óleo combustível ou gás natural), o real impacto da Eficiência Energética implicaria reduzir a necessidade de novos investimentos, contribuindo para mitigar os impactos ambientais.

Este trabalho tem como motivação principal incorporar medidas de Eficiência Energética ou Intensidade Energética na função de demanda industrial e assim determinar os parâmetros relevantes para explicar tal demanda. Respondendo a questão principal deste trabalho, se o aumento da Eficiência Energética ajudaria na conservação de energia e se ajudar qual o real impacto ou magnitude desta contribuição.

Parte-se da hipótese de que o aumento da intensidade energética percebido na Figura 4 deve-se principalmente ao aumento de participação de setores energo-intensivos na indústria brasileira, ou seja, o Efeito Estrutural responde pela maior contribuição na explicação da Intensidade Energética. Esta hipótese se origina na percepção da estrutura da indústria brasileira exemplificada na Figura 3.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Determinar o impacto da Eficiência Energética ou Intensidade Energética na demanda de energia da indústria brasileira no período de 1970 a 2008.

1.3.2 Objetivos Específicos

- i) Decompor a Intensidade Energética Industrial brasileira entre: Efeito Estrutura e Efeito Intensidade.
- ii) Decompor o Consumo de Energia na Indústria brasileira entre: Efeito Atividade⁴, Efeito Estrutura e Efeito Intensidade.
- iii) Determinar as principais variáveis explicativas para o Efeito Intensidade.

⁴ O Efeito Atividade está definido no Capítulo 3 item 3.1.1

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

A energia é um importante insumo na produção dos mais variados produtos industriais. Alguns autores como Pindyck (1979), Kemfert (1998), Kemfert e Welsch (2000) entre outros, incluem a energia na função de produção junto às variáveis tradicionais, capital e trabalho.

Berndt e Wood (1975) argumentam que a demanda industrial por energia é essencialmente derivada da necessidade de produção que utilizam como insumo a energia, ou seja, a energia é um fator típico do processo de produção da firma. As firmas tendem a escolher os insumos que minimizam os custos totais de produção e ao mesmo tempo elevam ao máximo a produção de bens.

A possibilidade de substituição de insumos depende da tecnologia de produção e dos preços relativos de todos os insumos. Berndt e Wood (1975) concluem que energia e capital são complementares e ambos são considerados substitutos ao trabalho.

Dada a importância da energia no processo de produção industrial, a Teoria de Custos é um relevante instrumento para a compreensão da escolha das firmas entre tipo e quantidade de insumos utilizados na produção.

2.1 Teoria dos Custos⁵

A maximização do lucro está relacionada com a produção, a quantidade de insumos e seus respectivos preços; a tecnologia de produção adotada define as possibilidades de substituição entre os fatores. Em vista das diferentes possibilidades de substituição entre os fatores, é possível combiná-los de modo a minimizar os custos de produção, ou seja, a maximização do lucro pode ser feita via minimização dos custos.

Algumas vantagens da maximização do lucro via minimização dos custos podem ser enumeradas, entre elas estão:

- i) a função de custo é homogênea de grau um nos preços dos insumos e não decrescente no produto.
- ii) a função custo é côncava nos preços dos insumos.
- iii) a função de demanda dos fatores é homogênea de grau zero nos preços.

⁵ As seções subsequentes são baseadas em, Mas-colell, Whinston e Green (1995), Varian (1999), Binger e Hoffman (1998), Debertin (1987) e Chiang (1982).

- iv) se a função de produção é homogênea de grau um, então a função custo e a demanda por fatores é homogênea de grau um no produto.
- v) se a função de produção é côncava, então a função custo é convexa no produto, em particular o custo marginal é não decrescente no produto.

2.1.1 Custos no Curto Prazo

A função de custo pode ser obtida a partir de três equações, função de produção, equação de custos e caminho de expansão. Lembrando que os preços dos fatores são dados.

A função de custo de curto prazo é apresentada como:

$$CT = g(P_{X_1}, P_{X_2}, Y) + CF \quad (2.1)$$

em que, CT é o custo total, P_{X_1} é o preço do insumo X_1 , P_{X_2} é o preço do insumo X_2 , Y é o produto e CF custo fixo.

A função custo representa o custo mínimo de produção de cada nível de produto e é obtida supondo-se racionalidade do empresário. O termo função custo é usado para expressar o custo como função do nível de produção, enquanto que o termo equação de custo é usado para expressar o custo em termos de quantidade e preços dos fatores. A demonstração da função custo será apresentada adiante.

Considera-se curto prazo se pelo menos um dos fatores de produção não puder variar no período considerado, ao passo que, no longo prazo, todos os fatores podem variar. Neste caso o CT não apresenta um termo de CF.

Define-se Custo Médio (CMe) como o custo unitário de produção de cada unidade adicional produzida, matematicamente:

$$CMe = \frac{CT}{Y} = \frac{g(Y) + CF}{Y} \quad (2.2)$$

Define-se Custo Marginal (CMg) como custo adicional de cada nova unidade produzida.

$$CMg = \frac{\partial CT}{\partial Y} = \frac{\partial g(Y)}{\partial Y} = g'(Y) \quad (2.3)$$

A maximização do lucro sem condicionalidade pode ser expresso como:

$$\pi = RT - CT = P_Y Y - g(Y) - CF \quad (2.4)$$

Na abordagem dos custos, a variável de decisão é o produto, logo para maximizar o lucro deriva-se a função lucro com relação a Y e iguala-se a zero,

$$\frac{\partial \pi}{\partial Y} = P_Y - g'(Y) = 0 \Rightarrow P_Y = CMg \quad (2.5)$$

Este resultado indica que, para maximizar o lucro, o empresário deve igualar o preço de venda do produto (P_Y) ao custo marginal (CMg).

Observa-se que $RT = P_Y Y \Rightarrow RMg = P_Y$, logo, $RMg = CMg$. Assim, o empresário pode aumentar seu lucro expandindo a produção, se a venda de uma unidade adicional do produto (receita marginal) corresponde (P_Y) for maior que o acréscimo de custo (CMg).

Para garantir que a condição de maximização de lucro (primeira ordem) ocorra é necessário que as condições de segunda ordem sejam satisfeitas, ou seja, a segunda derivada da função lucro deve ser menor que zero:

$$\frac{\partial^2 \pi}{\partial Y^2} = \frac{\partial^2 CT}{\partial Y^2} = \frac{\partial(CMg)}{\partial Y} = -g''(Y) < 0 \quad (2.6)$$

Ou melhor,

$$g''(Y) > 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 CT}{\partial Y^2} > 0 \quad (2.7)$$

Isto que dizer que o CMg deve ser crescente ao nível de produção que maximiza o lucro, se fosse decrescente, a igualdade entre o preço e CMg indicaria um ponto de lucro mínimo. A expressão (2.7) implica que, para maximizar o lucro, deve-se igualar o preço do produto ao custo marginal na fase ascendente da curva de custo marginal.

2.1.2 Custo no Longo Prazo

Como dito anteriormente, o longo prazo se caracteriza como o período de tempo no qual todos os fatores de produção são variáveis, isto é, não há qualquer fator fixo, tal como tamanho da planta ou investimento em equipamento de capital. Antes de investir, o empresário está em uma situação de longo prazo, ou seja, pode selecionar qualquer investimento dentre todas as opções disponíveis. Depois que investiu, isto é, depois que a decisão é tomada, o empresário opera sob condições de curto prazo.

Considerando que a limitação de recursos impõe limitação na quantidade produzida, o problema de maximização do lucro (minimização dos custos) pode ser elaborado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min } C &= P_{X_1} X_1 + P_{X_2} X_2 \\ \text{S.A } Y &\geq f(X_1, X_2) \end{aligned} \quad (2.8)$$

A expressão (2.8) é a forma dual do problema de maximização da receita total sujeito a disponibilidade orçamentária. A solução desse problema levará à obtenção das demandas condicionadas dos fatores e à função indireta de custo.

Aplicando o Lagrangeano,

$$L = P_{X_1} X_1 + P_{X_2} X_2 + \mu[Y - f(X_1, X_2)] \quad (2.9)$$

Derivando o Lagrange com relação a X_1 , X_2 e a μ , obtêm-se as condições de primeira ordem para minimização dos custos:

$$\frac{\partial L}{\partial X_1} = P_{X_1} - \mu f_1 = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial X_2} = P_{X_2} - \mu f_2 = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = Y - f(X_1, X_2) = 0 \quad (2.12)$$

Resolvendo as equações (2.10) e (2.11), tem-se:

$$\frac{P_{X_1}}{f_1} = \frac{P_{X_2}}{f_2} = \mu \quad (2.13)$$

As condições de primeira ordem para minimização de custos sujeita, a dada restrição na produção, são semelhantes às do problema primal. Neste caso a firma procura a Isocusto mais baixa que contém, pelo menos, um ponto comum com a Isoquanta determinada. Seu custo mínimo é dado pela Isocusto que é exatamente tangente à Isoquanta determinada.

O multiplicador de Lagrange encontrado no problema dual tem relação inversa com o multiplicador encontrado no problema primal, em que o multiplicador era igual à razão das produtividades marginais dos fatores pelos respectivos preços, conclui-se que $\lambda = \frac{1}{\mu}$.

Assim, se a condição de segunda ordem for satisfeita, cada ponto de tangência entre uma Isoquanta e uma Isocusto é uma solução tanto para o problema de maximização condicionado como para um de mínimo condicionado. Em outras palavras, um problema de maximização é um problema de minimização e, portanto as soluções são iguais.

Isolando X_1 na equação (2.13) e substituindo na equação (2.12), obtém-se a demanda condicionada para o fator X_2 , o mesmo pode ser feito para o fator X_1 . A demanda encontrada é chamada condicionada, já que é condicionada a determinada produção diferente daquelas obtidas da maximização sem restrições.

A demanda dos fatores encontrada tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} X_1^C &= x_1^c(P_{X_1}, P_{X_2}, Y) \\ X_2^C &= x_2^c(P_{X_1}, P_{X_2}, Y) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Tomando as demandas condicionadas X_i^C e substituindo na expressão (2.8) e resolvendo em função de C , obtém-se a função indireta de custo na forma:

$$C = C(P_{X_1}, P_{X_2}, Y) \quad (2.15)$$

A equação (2.15) é chamada de função de custo de longo prazo, pois considera todas as possibilidades de variações nos fatores e no nível de produto.

Para finalizar, uma vez obtida a função indireta de custo (2.15), é possível a partir do Teorema de Shepard, obter as funções de demanda condicionadas dos fatores, basta derivar a função de custo com relação à P_{X_1} e a P_{X_2} para se obter a demanda do fator X_1 e X_2 .

$$\frac{\partial C}{\partial P_{X_1}} = X_1^c = x_1^c(P_{X_1}, P_{X_2}, Y) \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial C}{\partial P_{X_2}} = X_2^c = x_2^c(P_{X_1}, P_{X_2}, Y) \quad (2.17)$$

2.2 Modelos Empíricos de Demanda de Energia

Há tempos, estudos da demanda de energia pela indústria despertam o interesse da comunidade científica, sendo a indústria a principal consumidora de energia no mundo. Nas últimas décadas, a oferta de energia na forma de petróleo e gás natural, passou a ser controlada por poucos *players* mundiais, fator que também contribui para o desenvolvimento de pesquisas.

Berndt e Wood (1975) assumem uma função de produção para os Estados Unidos contendo como fatores de produção, capital, trabalho, insumos intermediários e energia, admitindo arbitrariamente a forma funcional translog como função de custo.

Os autores linearizaram a função custo, e a demanda condicionada dos fatores de produção passou a representar a participação de custo do fator energia sobre o custo total de produção. O produto (Y) não foi utilizado pelos autores como variável explanatória, para explicar a demanda por energia. A equação (2.18) denota a diferenciação da função de custo *translog* enquanto (2.19) mostra a equação estimada para a demanda compensada de energia:

$$\frac{\partial \ln C}{\partial \ln P_i} = \frac{\partial C}{\partial P_i} \times \frac{P_i}{C} = M_i \quad (2.18)$$

$$M_E = \frac{P_E X_E}{C} = \alpha_E + \gamma_{KE} \ln P_K + \gamma_{LE} \ln P_L + \gamma_{EE} \ln P_E + \gamma_{ME} \ln P_M \quad (2.19)$$

em que M_E é a participação do gasto do bem E no total de despesas C , P_E , P_K , P_L e P_M são respectivamente o preço Energia, Capital, Trabalho e Insumos Intermediários.

A demanda por energia primária como petróleo, carvão, gás natural e eletricidade foi analisada por McRae (1979) para diferentes regiões do Canadá, onde a produção não foi utilizada como variável explanatória para explicar a demanda por estes fatores, fazendo uso apenas do preço, o que está em concordância com o proposto na literatura [Berndt e Wood, 1975].

Pindyck (1979) realizou uma análise da demanda por energia primária para dez países desenvolvidos, utilizando além da energia, capital e trabalho como fatores de produção. O autor incorpora a produção industrial como variável explicativa da demanda por energia, diferentemente das considerações feitas por Berndt e Wood (1975) e McRae (1979).

A equação proposta estimada para a demanda de energia está mostrada a seguir:

$$M_E = \frac{P_E X_E}{C} = \alpha_E + \gamma_{YE} \ln Y + \sum_J \gamma_{EJ} \ln P_J \quad (2.20)$$

Conforme argumenta Clarke (1983), a equação de demanda do fator é independente do produto, pois este não é exógeno na determinação dos insumos, ou seja, é determinado recursivamente na função de produção da firma. Em geral, é o preço real dos fatores de produção e não somente o próprio preço do fator que determina a demanda por este.

Argumenta ainda que, ao contrário das funções de demanda por energia industrial frequentemente utilizadas na literatura, a correta especificação da função é independente do produto, mas dependente do preço real da energia assim como do preço de todos os demais fatores de produção.

Contudo, a inclusão do produto como uma variável explanatória implica dizer que a firma assume minimização dos custos, ou seja, o produto passa ser uma variável exógena e que os fatores são escolhidos para atingir tal nível de produção (Clarke, 1983).

Arsenault et. al (1995) estimaram a demanda total de energia para Québec, no Canadá. Além da demanda total, os autores estimaram também a demanda de cada fator de produção, petróleo e gás natural. As equações estimadas são:

$$M_t^i = f(M_{t-1}^i, PO_t, PNG_t) \quad (2.21)$$

$$TE_t = h(TE_{t-1}, PE_t/PI_t, IN_t) \quad (2.22)$$

em que, M_t^i é a participação de cada fator i no custo total de produção, PO é o preço do petróleo e PNG é o preço do gás natural; TE é a demanda total de energia em Terajoules, PE é índice de preços de petróleo e gás, PI índice de preços geral da economia e IN é o PIB industrial.

Yi (2000) compara dois modelos de demanda de energia, o translog e o Leontief Generalizado. Além disso, estima a demanda de energia para cada setor industrial: alimentos e bebidas, têxtil, madeira, papel e impressão, químico, minerais não-ferrosos, metais e maquinário.

Outra diferença dos modelos anteriormente apresentados é a incorporação da variável mudança tecnológica à equação de demanda de energia. A equação estimada da demanda de energia é mostrada a seguir:

$$M_E = \frac{P_E X_E}{C} = \alpha_E + \gamma_{YE} \ln Y + \sum_J \gamma_{EJ} \ln P_J + \gamma_T T \quad (2.23)$$

em que, T representa mudança técnica.

Kulshreshtha e Parikh (2000) estimaram equação de demanda de carvão para diferentes setores industriais na Índia. Os autores utilizaram o modelo de cointegração para estudar a relação entre o consumo de carvão, preço e produção industrial. Concluindo que a demanda por carvão é mais sensível às mudanças no valor adicionado na indústria que variação no preço do carvão.

Griffin e Schulman (2005) utilizaram um índice técnico de eficiência energética na equação de demanda de energia para 16 países da OECD em um modelo de séries temporais. A equação estimada é,

$$Q/N_t = f(I/N_t, \gamma(L)P_t, Z_t) \quad (2.24)$$

em que, Q/N é o consumo per capita de energia, I/N é a renda per capita, $\gamma(L)P_t$ é o operador de defasagem do preço de energia e Z é o índice de eficiência energética. Contudo, como são usados dados em painel, removeu-se a variável Z e no lugar foi colocada uma variável dummy como efeito fixo para captar a mudança tecnológica entre os países.

Polemis (2007) utiliza o modelo de correção de erros (ECM) para estimar a demanda por Óleo Combustível e Eletricidade para a indústria Grega. As equações estimadas são:

$$a(L)OIL_t = \mu + \beta(L)DBP_t + \gamma(L)RPOIL_t + \delta(L)RPELEC_t + u_t \quad (2.25)$$

$$c(L)ELEC_t = \varepsilon + \zeta(L)DBP_t + \eta(L)RPOIL_t + \theta(L)RPELEC_t + \lambda(L)CONS_t + u_t \quad (2.26)$$

em que, $a(L)$, $\beta(L)$, $\gamma(L)$, $\delta(L)$, $c(L)$, $\zeta(L)$, $\eta(L)$, $\theta(L)$ e $\lambda(L)$ representam operadores de defasagem. DBP é o PIB industrial, RPELEC e RPOIL são os índices de preços da eletricidade e Óleo Combustível respectivamente e por fim CONS é a voltagem média dos consumidores de energia.

Este trabalho propõe, com base em todos os trabalhos acima citados, estimar uma equação de demanda de energia para a indústria brasileira utilizando um índice de eficiência energética obtida através da decomposição da intensidade energética da indústria. A metodologia de decomposição será mostrada no próximo capítulo. A equação a ser estimada é:

$$E_t = f(Y_t, P_t, P_t^S, IIE_t) \quad (2.27)$$

Em que, E_t é a demanda agregada de energia pela indústria, Y_t é o produto industrial ou valor agregado, P_t é um índice ponderado dos preços dos diferentes insumos energéticos utilizados pela indústria, P_t^S é o nível de salário médio da indústria e IIE_t é o índice de intensidade energética (Efeito Intensidade). Utilizar-se-á o Modelo de Cointegração para estimar a demanda de energia de longo prazo.

3 REFERENCIAL ANALÍTICO

3.1 Decomposição da Intensidade Energética

Eficiência Energética se refere à atividade ou produto que pode ser produzido com uma determinada quantidade de energia com, por exemplo, toneladas de aço por megawatt-hora de energia. Eficiência Energética pode ser traduzida como a melhora na produção de determinado bem ou serviço a partir de quantidades reduzidas de insumos utilizados na produção.

Na economia, levando em consideração todos os setores produtivos, a eficiência energética não é um conceito significativo devido à natureza heterogênea da produção, diferenças estas que podem ser em produtos, processos e equipamentos. Por outro lado, comparações a respeito da Intensidade Energética são mais facilmente percebidas.

Ao nível de uma tecnologia específica, a diferença entre eficiência e intensidade energética é insignificante, ou seja, uma é o inverso da outra. Por Intensidade Energética se entende a razão entre o consumo de energia e o produto gerado, seja medido em termos físicos ou em termos monetários, como, por exemplo, o PIB, ou no caso deste trabalho, valor adicionado da indústria.

A diferença entre intensidade e eficiência é mais evidente quando múltiplas tecnologias ou vários produtos são utilizados ou produzidos na economia. Por exemplo, é difícil comparar a eficiência energética da produção de aço com a eficiência na produção de etanol, neste caso comparar as intensidades energéticas de ambos os setores é possível.

Como destaca Ang (2004) a intensidade energética está relacionada com a eficiência técnica dos processos e atividades e os padrões de consumo de cada setor. O processo que transforma energia final em energia útil influencia a quantidade de energia necessária para produção de bens e serviços. Desse modo, mede-se por este indicador, o grau de eficiência com que a energia é utilizada.

Dessa forma, melhorar a eficiência nos processos e equipamentos contribui para mudanças na intensidade energética, que por sua vez pode ser considerada como *proxy* para Eficiência Energética.

A principal diferença entre intensidade e eficiência energética é com relação a mudanças estruturais. Mudanças na composição dos setores e/ou participação na produção e consumo de energia podem afetar a intensidade energética, mas não estão relacionadas com a melhoria da eficiência. No setor industrial, uma mudança na produção e/ou participação de

indústrias energo-intensivas (metal primário, químicos, papel e celulose) para setores que utilizarão menos intensamente energia (alimentos) causam diminuição na intensidade energética que não reflete necessariamente um aumento na eficiência energética.

Os indicadores de Intensidade Energética medem no mais alto nível, o esforço de um país para se obter o desenvolvimento econômico a partir do insumo energético. Sendo assim, o comportamento ideal deste indicador seria um crescimento econômico contínuo com redução ou estabilização na demanda/oferta de energia. Obtém-se a redução da intensidade pelo aumento da eficiência dos processos, mas também pelo melhor uso econômico (EPE, 2007a).

Existem vários métodos de decomposição da Intensidade Energética e do Consumo de Energia; a próxima seção discorrerá a respeito da evolução de tais métodos.

3.1.1 Métodos de Decomposição

Os métodos de decomposição populares entre os analistas de consumo energia e intensidade energética podem ser divididos em dois grupos: os métodos relacionados com o índice de Laspeyres e métodos relacionados com o índice de Divisia. Bem conhecido em estudos econômicos, o índice de Laspeyres mede a variação percentual em algum aspecto de um grupo de itens ao longo do tempo, usando pesos baseados nos valores de alguns anos base. O índice Divisia é uma soma ponderada das taxas de crescimento logarítmico, onde os pesos são partes dos componentes do valor total, dado na forma de uma linha integral.

Em termos simples, a construção de métodos ligados ao índice de Laspeyres é baseada no conceito familiar de variação percentual, enquanto que a construção de métodos relacionados com o índice de Divisia é baseado no conceito de mudança logarítmica (Ang, 2004).

Diversos trabalhos foram feitos nas últimas três décadas utilizando métodos de decomposição de energia, os mais utilizados entre as décadas de 1970, 1980 e início de 1990 foram os métodos baseados no índice de Laspeyres. Howarth *et. al* (1991) decompôs a intensidade energética na indústria entre os anos de 1973 e 1987 para oito países membros da OECD. Através da metodologia de classificação proposta por Ang (2004), o método de decomposição utilizado por Howarth *et. al* (1991) pode ser chamado de método convencional de índice de Laspeyres.

Os setores industriais foram desagregados em seis subsetores: papel e celulose, químicos, cimento, cerâmica e vidro, metais ferrosos, metais não ferrosos, e outros (outras

atividades de manufatura). O autor ressalta que os cinco primeiros setores correspondem a 25% do valor adicionado na indústria, porém são responsáveis pelo consumo de 75% da energia.

Howarth *et. al* (1991) utilizaram as seguintes notações para a decomposição da intensidade energética:

E = uso total de energia na indústria.

Q = produto industrial total medido em valor adicionado real.

I_i = vetor de intensidade energética, que é dado pela razão $\left\{ \frac{E_i}{Q_i} \right\}$.

S_i = vetor de coeficientes estruturais, participação no produto do subsetor i , que é denotado por $\left\{ \frac{Q_i}{Q} \right\}$.

em que, o subscrito i denota o subsetor, E_i é a energia usada no subsetor i e Q_i é o produto no subsetor i .

De acordo com as notações descritas, o uso total de energia pode ser definido em função da produção industrial, intensidade e variável estrutural.

$$E = Q \mathbf{I} \times \mathbf{I}^{-1} \quad (3.1)$$

Dessa forma, tem-se:

$$LI = \frac{Q(0)[S(1)I(0)]}{E(0)} = \frac{S(1)I(0)}{S(0)I(0)} \quad (3.2)$$

$$LS = \frac{Q(0)[S(0)I(1)]}{E(0)} = \frac{S(0)I(1)}{S(0)I(0)} \quad (3.3)$$

em que, 0 e 1 denotam os anos de 1973 e 1987. LS é o índice de Laspeyres da variação relativa no uso da energia devido a mudança estrutural, LI é o índice de Laspeyres relativo a variação no uso da energia devido a mudança na intensidade energética.

Howarth *et. al* (1991) chegaram a conclusão que no período analisado, a mudança estrutural teve pequeno impacto na redução do uso de energia, inclusive foi responsável por um substancial aumento no consumo de energia na Noruega. Por outro lado, a intensidade

energética reduziu o consumo de energia de maneira notavelmente uniforme entre todos os países pesquisados como, por exemplo, redução de 20% na Noruega, 36% e no Japão.

Contudo, o trabalho de Howarth et. al (1991) é criticado pois a decomposição utilizada não é perfeita, ou seja, há resíduo. O autor denota o resíduo como termo de interação, que captura a relação entre mudanças nos termos estruturais e intensivos.

Sun (1998) propõe alterações na decomposição de energia através do índice de Laspeyres de forma que não haja resíduo. Pela metodologia de classificação proposta por Ang (2004), o novo método de decomposição denomina-se índice de Laspeyres Refinado.

A proposta do trabalho de Sun (1998) é de fornecer um modelo de decomposição completo, que seja confiável e preciso. A ideia básica é decompor o resíduo de acordo com o princípio de “igual distribuição”, ou seja, distribuir o resíduo igualmente entre as diferentes variáveis de decomposição. A seguir o modelo proposto.

Assume-se que $V = x * y$, isto é, a variável V é determinada pelos fatores x e y , no período de tempo entre $[0, t]$, a variação em V (ΔV) pode ser calculado como:

$$\begin{aligned}\Delta V &= V^t - V^0 = x^t y^t - x^0 y^0 \\ &= (x^t - x^0) y^0 + (y^t - y^0) x^0 + (x^t - x^0)(y^t - y^0)\end{aligned}$$

$$\Delta V = y^0 \Delta x + x^0 \Delta y + \Delta x \Delta y \quad (3.4)$$

em que $y^0 \Delta x$ e $x^0 \Delta y$ são as contribuições da variação dos fatores x e y na variação total em V , o terceiro termo ($\Delta x \Delta y$) é o resíduo no modelo de decomposição geral. O modelo completo de decomposição pode ser visto na Figura 5.

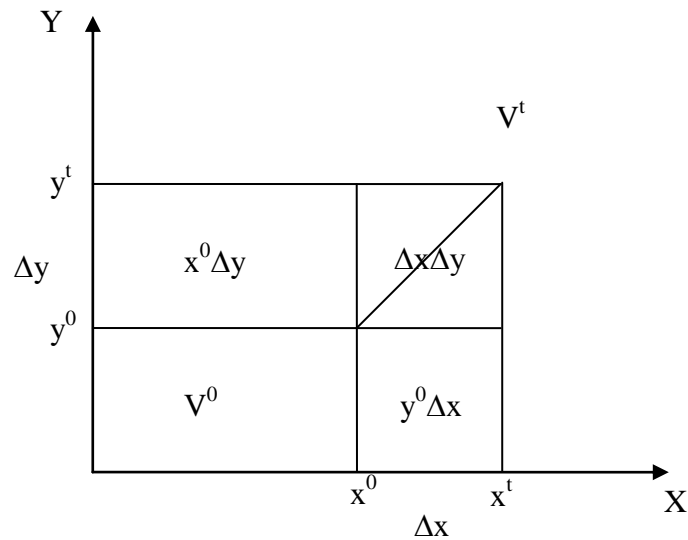


Figura 5 - Efeito principal e contribuições dos fatores x e y

O terceiro termo pode ser atribuído a x ou a y de igual modo. A contribuição depende de ambos, pois se um zera, o outro também desaparece. Quando não há razão para que se assuma o contrário, o resíduo é dividido igualmente entre x e y . Portanto, o modelo completo de decomposição pode ser mostrado como:

$$X_{efeito} = y^0 + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y \quad (3.5)$$

$$Y_{efeito} = x^0 + \frac{1}{2} \Delta x \Delta y$$

$$\Delta V = X_{efeito} + Y_{efeito} \quad (3.6)$$

Na forma de índice o modelo pode ser mostrado como:

$$\frac{V^t}{V^0} = 1 + \frac{X_{efeito}}{V^0} + \frac{Y_{efeito}}{V^0} \quad (3.7)$$

$$\frac{\Delta V}{V^0} = \frac{X_{efeito}}{V^0} + \frac{Y_{efeito}}{V^0} \quad (3.8)$$

O modelo pode ser estendido para n fatores, porém torna-se cada vez mais complicado determinar os termos da decomposição.

Sun (1998) apresenta dois modelos, um para decomposição do consumo de energia e outro para decomposição da intensidade energética.

Seja o consumo de energia na indústria denotado por $E^t = Q^t \sum_i I_i^t S_i^t$. Repare que não há diferença entre a equação (3.1) em Howarth et. al (1991). Neste modelo, a variação no consumo de energia é influenciada por três efeitos como ressalta Motta e Araújo (1989):

Efeito Atividade (EQ) = variações de curto prazo no nível de atividade econômica que podem não resultar em variações proporcionais no consumo de energia, no caso de aumento de atividade, plantas menos eficientes podem entrar em operação ou mesmo rendimentos decrescentes na utilização da energia, por outro lado, o consumo de energia pode não ser reduzido na mesma proporção caso a atividade econômica diminua.

Efeito Estrutural ou Mix (ES) = aumento ou redução da participação de um setor no produto total pode alterar a intensidade energética total de acordo com a intensidade deste setor, como por exemplo, se setores mais intensivos em energia crescem a taxas superiores às setores menos intensivos, então a intensidade total crescerá devido a este movimento e sem que haja mudanças técnicas no conteúdo energético da produção de cada setor.

Efeito Intensidade (EI) = os insumos utilizados na produção como capital, trabalho e energia podem ser combinados em diferentes proporções, seja por decorrência de alterações nos seus preços relativos, de melhorias técnicas ou do progresso tecnológico. Podem ocorrer alterações de intensidade resultante da melhoria técnica que acompanha uma ampliação ou modificação de plantas visando a um maior ganho de eficiência no uso da energia. Variações de preços relativos entre os insumos energéticos podem da mesma forma resultar, no curto prazo, em emprego de combustíveis menos eficientes intensificando o conteúdo energético.

O modelo de decomposição da variação do consumo de energia é dado por:

$$EQ = \Delta Q \sum_i I_i^0 S_i^0 + \frac{1}{2} Q \sum_i (I_i^0 \Delta S_i + \Delta I_i S_i^0) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_i \Delta I_i \Delta S_i \quad (3.9)$$

$$EI = Q^0 \sum_i \Delta I_i S_i^0 + \frac{1}{2} \sum_i \Delta I_i (Q^0 \Delta S_i + \Delta Q^0 S_i^0) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_i \Delta I_i \Delta S_i \quad (3.10)$$

$$ES = Q^0 \sum_i I_i^0 \Delta S_i + \frac{1}{2} \sum_i \Delta S_i (Q^0 \Delta I_i + \Delta Q^0 I_i^0) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_i \Delta I_i \Delta S_i \quad (3.11)$$

A soma das equações (3.9), (3.10) e (3.11) demonstra que a decomposição é exata,

$$\Delta E = EQ + EI + ES \quad (3.12)$$

Ou, na forma de índice,

$$\frac{\Delta E^t}{E^0} = \frac{EQ^t}{E^0} + \frac{EI^t}{E^0} + \frac{ES^t}{E^0} \quad (3.13)$$

$$\frac{E^t}{E^0} = 1 + \frac{EQ^t}{E^0} + \frac{EI^t}{E^0} + \frac{ES^t}{E^0} \quad (3.14)$$

A contribuição do setor i na variação do consumo total de energia é dada pela equação:

$$E_i = I_i^0 S_i^0 + Q^0 (I_i^0 \Delta S_i + \Delta I_i S_i^0) + Q^0 \Delta I_i \Delta S_i + \Delta Q I_i^0 \Delta S_i + \Delta Q \Delta I_i S_i^0 + \Delta Q \Delta I_i \Delta S_i \quad (3.15)$$

As equações (3.9), (3.10) e (3.11) mostram a decomposição da variação no consumo de energia, porém Sun (1998) apresenta a decomposição da variação na intensidade energética que será utilizada nesse trabalho para mensurar o impacto da eficiência energética na demanda por energia pela indústria brasileira.

Neste modelo há apenas dois efeitos que determinam a variação na intensidade energética, são eles, Efeito Intensidade (II) e Efeito Estrutural (IS) que são dados pela variação da intensidade energética, $\Delta I = I^t - I^0$.

$$II = \sum_i S_i^0 \Delta I_i + \frac{1}{2} \sum_i \Delta I_i \Delta S_i \quad (3.16)$$

$$IS = \sum_i I_i \Delta S_i^0 + \frac{1}{2} \sum_i \Delta I_i \Delta S_i \quad (3.17)$$

A contribuição de cada setor i da indústria na variação total da intensidade energética é dada por:

$$I_i = S_i^0 \Delta I_i + I_i^0 \Delta S_i + \Delta I_i \Delta S_i \quad (3.18)$$

A soma das equações (3.16) e (3.17) mostram a decomposição exata da intensidade.

$$\begin{aligned} I^t &= I^0 + \Delta I \\ \Delta I &= II + IS \end{aligned} \quad (3.19)$$

Utilizando (3.19), mostra-se a decomposição na forma de índice:

$$\frac{\Delta I}{I^0} = \frac{II}{I^0} + \frac{IS}{I^0} \quad (3.20)$$

$$\frac{I^t}{I^0} = 1 + \frac{II}{I^0} + \frac{IS}{I^0} \quad (3.21)$$

Boyd *et. al* (1987) propuseram a abordagem do índice Divisia, como alternativa à abordagem índice de Laspeyres na análise de decomposição do consumo energia e intensidade energética. Posteriormente, extensões e aperfeiçoamento de métodos ligados ao índice de Divisia foram feitas por Boyd *et. al* (1988), Liu *et. al* (1992), Ang (1994), Ang e Choi (1997), Ang *et. al* (1998) e Ang e Liu (2001) como ressaltam Ang (2004).

O modelo de decomposição de intensidade energética mostrado a seguir terá como base os trabalhos de Ang e Zhang (2000) e Choi e Ang (2003).

Seja a intensidade energética agregada dada por:

$$I = \sum_{i=1}^n I_i S_i = \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{Y_i} \frac{Y_i}{Y} \quad (3.21)$$

Diferenciando a equação (3.21) como relação ao tempo t , tem-se:

$$\frac{dI}{dt} = \sum_{i=1}^n S_i \frac{dI_i}{dt} + \sum_{i=1}^n I_i \frac{dS_i}{dt} \quad (3.22)$$

Integrando ambos os lados da equação (3.22) no intervalo $[0,t]$, tem-se:

$$I^t - I^0 = \sum_{i=1}^n \int_0^t S_i \frac{dI_i}{dt} dt + \sum_{i=1}^n \int_0^t I_i \frac{dS_i}{dt} dt \quad (3.23)$$

O primeiro termo da equação (3.23) pode ser interpretado como efeito associado à variação da intensidade energética e o segundo termo é o efeito associado à variação no mix de produto ou na estrutura.

Utilizando o teorema do valor médio para a integral proposto por Spiegel (1963), é possível reescrever a equação (3.23) como:

$$I^t - I^0 = \sum_{i=1}^n S_i^* (I_i^t - I_i^0) + \sum_{i=1}^n I_i^* (S_i^t - S_i^0) \quad (4.24)$$

Em que $S_i^* = S_i(t_{i,S})$ e $I_i^* = I_i(t_{i,I})$ com $t_{i,S}$ e $t_{i,I} \in [0, t]$, ou seja, S_i^* e I_i^* representam a média das variáveis S e I , porém a forma funcional não é especificada *a priori*.

O método de decomposição pelo índice de Divisia mostrado anteriormente, equação (3.24), é chamado de decomposição aditiva, pois é baseado na diferença entre a intensidade energética em dois períodos distintos, todavia, o método permite que seja feito a decomposição baseada na razão entre as intensidades chamada de decomposição multiplicativa.

Choi e Ang (2003) argumentam que a escolha entre a forma da decomposição é *ad hoc*, pois devido a propriedade de simetria entre as duas fórmulas de decomposição estas podem ser intercambiáveis.

Uma das diferenças entre as duas fórmulas de decomposição é que os resultados da decomposição por diferença mantêm a mesma unidade de medida da variável utilizada, o indicador agregado, enquanto que na decomposição por relação à unidade de medida do índice passa a ser adimensional.

Ang e Zhang (2000) argumentam que a escolha entre a decomposição multiplicativa e aditiva é sutil e metodologicamente a diferença reside na facilidade de apresentação de resultados e interpretação. Quando a decomposição é realizada para uma série periódica, é mais conveniente usar a abordagem multiplicativa, como os resultados da decomposição geralmente são dados em índices, pode ser convenientemente traçada ao longo do tempo. Alguns estudos utilizam os dados de apenas dois períodos de referência, especialmente

quando o nível de desagregação do setor é alto e os dados periódicos não estão disponíveis, nesses casos a decomposição aditiva pode ser adotada.

Dessa forma, apresenta-se a decomposição por relação.

Dividindo a equação (3.22) pelo índice agregado de intensidade (I), tem-se:

$$\frac{d \ln I}{dt} = \sum_{i=1}^n w_i \frac{d \ln I_i}{dt} + \sum_{i=1}^n w_i \frac{d \ln S_i}{dt} \quad (3.25)$$

$$\text{Onde, } w_i = \frac{I_i S_i}{I} = \frac{E_i}{E}$$

Integrando a equação (3.25) com relação a t $[0, t]$,

$$\frac{I^t}{I^0} = \exp\left(\sum_{i=1}^n \int_0^t w_i \frac{d \ln I_i}{dt} dt\right) \exp\left(\sum_{i=1}^n \int_0^t w_i \frac{d \ln S_i}{dt} dt\right) \quad (3.26)$$

Mais uma vez utilizando o valor médio para a integral, (3.26) pode ser escrito na forma discreta aproximada:

$$\frac{I^t}{I^0} = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i^* \ln \frac{I_i^t}{I_i^0}\right) \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i^* \ln \frac{S_i^t}{S_i^0}\right) \quad (3.27)$$

Em que $w_i^* = w_i(t_{i,w})$ e $t_{i,w} \in [0, t]$, como já foi dito anteriormente, w_i^* é uma média sem, contudo, ser definido sua forma funcional.

Choi e Ang (2003) *apud* Bennet (1920) sugerem a média aritmética como forma funcional nas equações (3.24) e (3.27) para as variáveis com asterisco.

$$I_i^* = \frac{I_i^t - I_i^0}{2}, \quad S_i^* = \frac{S_i^t - S_i^0}{2} \quad (3.28)$$

Por outro lado, Ang e Choi (1997) propõem a utilização da média logarítmica em substituição à média aritmética nas equações (3.24) e (3.27), tem-se:

$$I_i^* = \frac{L(I_i^t S_i^t, I_i^0 S_i^0)}{L(S_i^t, S_i^0)}, \quad S_i^* = \frac{L(I_i^t S_i^t, I_i^0 S_i^0)}{L(I_i^t, I_i^0)} \quad (3.29)$$

Em que a média logarítmica L, é definida como:

$$L(x, y) = \begin{cases} \frac{(x - y)}{(\ln x - \ln y)}, & x \neq y \\ x, & x = y \end{cases} \quad (3.30)$$

Substituindo (3.29) em (3.24) e (3.27), tem-se:

$$I^t - I^0 = \sum_{i=1}^n \frac{L(I_i^t S_i^t, I_i^0 S_i^0)}{L(S_i^t, S_i^0)} (I_i^t - I_i^0) + \sum_{i=1}^n \frac{L(I_i^t S_i^t, I_i^0 S_i^0)}{L(I_i^t, I_i^0)} (S_i^t - S_i^0) \quad (3.31)$$

$$\frac{I^t}{I^0} = \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{L(I_i^t S_i^t, I_i^0 S_i^0)}{L(S_i^t, S_i^0)} \ln \frac{I_i^t}{I_i^0}\right) \exp\left(\sum_{i=1}^n \frac{L(I_i^t S_i^t, I_i^0 S_i^0)}{L(I_i^t, I_i^0)} \ln \frac{S_i^t}{S_i^0}\right) \quad (3.32)$$

3.1.2 Atribuições desejáveis para os Métodos de Decomposição

Do ponto de vista da fundamentação teórica, alguns métodos podem ser facilmente demonstrados superiores aos outros, contudo do ponto de vista de aplicação, onde a facilidade de uso e a simplicidade são considerações importantes, os métodos mais utilizados podem ser diferentes daqueles cuja fundamentação teórica é a principal vantagem.

Geralmente, os pesquisadores e analistas de decomposição de índices precisam considerar, pelo menos, quatro questões de método de seleção (Ang, 2004):

- 1) Fundamentação teórica
- 2) Adaptabilidade,

3) Facilidade de uso (por exemplo, se um método de decomposição pode ser facilmente aplicados aos problemas de interesse), e

4) Facilidade de compreensão e apresentação de resultados.

Os métodos de análise de decomposição estão intimamente ligados à teoria dos números índices, dessa forma a fundamentação teórica baseiam-se em grande parte nos números índices. Fisher (1972) propôs uma série de testes para a identificação de propriedades desejáveis de números índices, são elas:

- i) Reversão no tempo
- ii) Circularidade
- iii) Reversão de fatores

O teste de Reversão no tempo exige que o número índice calculado para frente deva ser o inverso do calculado para trás. Simbolicamente, isso significa $D_{0T} = \frac{1}{D_{T0}}$ onde D refere-se ao índice de preços, quantidade ou valor. Da mesma forma, em estudos de decomposição, podemos aplicar este conceito e desejar que os resultados da decomposição sejam coerentes, não importando se a decomposição é realizada de forma prospectiva ou retrospectiva (Ang e Zhang, 2000).

O teste de circularidade pode ser expresso como $D_{0T} = D_{0S} \times D_{ST}$, onde o índice S é um determinado ponto do tempo entre 0 e T . Passando neste teste implica que o número índice D_{0T} não depende de como o indicador se desenvolve ao longo do tempo entre 0 e T .

O teste de reversão de fatores exige que todos os componentes da decomposição quando multiplicados (caso a decomposição seja multiplicativa) resultam na proporção observada de forma agregada, ou seja, $D = \prod_{i=1}^n D_i$. O número índice que passa pelos três testes pode ser chamado de perfeito ou exato, no caso dos índices de decomposição não haverá resíduo (Ang e Zhang, 2000).

Para os métodos de decomposição aditiva, os testes correspondentes podem ser obtidos facilmente, a reversão no tempo, circularidade e reversão de fatores podem ser expressas simbolicamente como:

$$\begin{aligned} \Delta V_{0T} &= -\Delta V_{T0} \\ \Delta V_{0T} &= \Delta V_{0S} + \Delta V_{ST} \end{aligned} \tag{3.33}$$

$$\Delta V = \sum_i \Delta V_i$$

Dos três testes, o teste de circularidade é o mais rigoroso. Fisher (1972) aponta que o teste de circularidade pode ser cumprido se os pesos são constantes, porém, nenhum número de índice prático pode satisfazer este teste e dessa forma ele é excluído do teste realizado por Ang e Zhang (2000). Outra preocupação na análise dos índices de decomposição é se o método pode acomodar valores “zero” nos dados. A presença de zeros coloca problemas computacionais de alguns métodos.

Dos três testes, o mais importante é o teste de reversão de fatores; métodos de decomposição que passam neste teste foram tomados por analistas como altamente desejáveis (Ang, 2004). Além disso, a decomposição pode ser realizada aditiva ou multiplicativamente e a escolha entre os dois é bastante arbitrária, a existência de uma associação simples e direta entre a decomposição aditiva e multiplicativa seria visto como uma propriedade boa do ponto de vista metodológico.

Métodos com um elevado grau de adaptabilidade poderiam ser aplicados a uma ampla gama de problemas de decomposição, incluindo séries de análises e comparações *cross-country*, com pouca dificuldade técnica ou prática. Mais especificamente, a adaptabilidade pode ser avaliada em termos do conjunto de dados, se um método é capaz de lidar com dado que apresentam grandes variações, valores nulos ou valores negativos (Ang, 2004).

Facilidade de uso refere-se à dificuldade com que o método pode ser aplicado para diferentes tipos de problemas. A fórmula de decomposição ou mesmo a dificuldade de interpretação dos resultados podem dificultar a utilização de um determinado método. Facilidade de interpretação dos resultados é em grande parte ligada a fundamentação teórica de um método e ligações possíveis entre a decomposição aditiva e multiplicativa para o método.

Por exemplo, os métodos que passam no teste de reversão de fatores não deixam resíduo, que tenderia a complicar a interpretação dos resultados. Em alguns casos a decomposição aditiva pode ser preferível à decomposição multiplicativa, ou vice-versa, pois os resultados podem ser mais facilmente compreendidos e comunicados e, como tais métodos que dão uma associação direta entre a decomposição aditiva e multiplicativa também pode levar à facilidade de interpretação dos resultados. Para mais detalhes a respeito da associação entre decomposição aditiva e multiplicativa pode ser consultado em Choi e Ang (2003).

3.1.3 Comparação entre Métodos de Decomposição

Ang e Zhang (2000) compararam diversos métodos de decomposição como relação aos testes de Reversão no Tempo, Reversão de Fator e Valor Zero, os resultados podem ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Teste de Fundamentação Teórica para índices de Decomposição

Métodos		Testes		
		Reversão no Tempo	Reversão de Fator	Valor Zero
Multiplicativa	Laspeyres	Não	Não	Sim
	Divisia com Média Aritmética	Sim	Não	Não
	Divisia com Média Logarítmica	Sim	Sim	Sim
	Paasche	Não	Não	Sim
Aditiva	Laspeyres	Não	Não	Sim
	Divisia com Média Aritmética	Sim	Não	Não
	Divisia com Média Logarítmica	Sim	Sim	Sim
	Paasche	Não	Não	Sim
	Marshall-Edgeworth	Sim	Não	Sim
	Laspeyres Refinado	Sim	Sim	Sim

Ang e Zhang (2000).

Com relação à decomposição multiplicativa, apenas o método que utiliza o índice de Divisia com média logarítmica passou nos três testes, o método de decomposição que adota o índice Laspeyres não passou no teste de inversão no tempo e no teste de reversão de fator, enquanto que o método de Divisia com Média Aritmética não passou no teste de inversão de fatores e no “valor zero”.

Pode ser visto também que apenas os métodos que utilizaram o índice Divisia com Média Logarítmica e o método de índice de Laspeyres Refinado possuem todas as três propriedades desejáveis na decomposição aditiva. É necessário relacionar algumas questões quanto à aplicação dos dois métodos (Ang e Zhang, 2000):

- i) ambos os métodos resultam em decomposições exatas, mas os mecanismos envolvidos são bastante diferentes. O método Laspeyres Refinado aloca o resíduo igualmente entre os efeitos principais, que intuitivamente é razoável. Por outro lado, o índice de Divisia com média logarítmica apresenta resultados sem resíduo, não precisando assim ser alocados entre os efeitos principais.
- ii) quando existem valores nulos no conjunto de dados, o método Laspeyres refinado é mais conveniente; o método de Divisia contém termos logarítmicos, porém o

problema de “valor zero” é efetivamente resolvido pelo método de Divisia com média logarítmica.

iii) o método de Divisia com média logarítmica tem fórmulas uniformes e concisas para todos os fatores e podem ser facilmente obtidas, independentemente do número de fatores. As fórmulas para o método Laspeyres Refinado são muito mais complexas, especialmente quando o número de fatores é superior a três, que é frequentemente o caso em estudos sobre a decomposição de indicadores ambientais.

Em relação ao método de Divisia com média aritmética, este apresenta duas deficiências. Primeira, não passa no teste de reversão de fatores, dessa forma, o método pode apresentar resíduo nas seguintes situações: (a) decomposição de *cross-country*, quando a variação dos dados entre países é grande, (b) a decomposição em uma base anual encadeada durante um longo período de tempo, os resíduos se acumulam ao longo do tempo, e (c) decomposição em uma base não-encadeada, mas os dois anos de decomposição estendem-se durante um longo período de tempo onde as mudanças nos dados são significativas (Ang, 2004).

A segunda insuficiência do método de Divisia com média aritmética é que ele falha quando o conjunto de dados contém valores zero, por exemplo, quando uma fonte de energia começa ou deixa de ser usada em um setor no período do estudo. Dessa forma, do ponto de vista da fundamentação teórica, o método de Divisia com média logarítmica é mais recomendado porque, primeiro, eles passam no teste de reversão de fatores e teste de reversão de tempo. Em segundo lugar, o método com decomposição multiplicativa também possui a propriedade da forma aditiva, ou seja, $\ln(D_{tot}) = \ln(D_{str}) + \ln(D_{int})$. Em terceiro lugar, os resultados das versões multiplicativas e aditivas estão ligados por uma fórmula simples⁶:

$$\frac{\Delta V_{tot}}{\ln D_{tot}} = \frac{\Delta V_{estr}}{\ln D_{estr}} + \frac{\Delta V_{int}}{\ln D_{int}} \quad (3.34)$$

Com esta simples relação, uma vez que têm o efeito estimado para um determinado fator em decomposição multiplicativa, o efeito correspondente estimado em decomposição

⁶ Para mais detalhes ver Ang (2004).

aditivo pode ser facilmente derivado, e vice-versa. Dessa forma, a escolha entre o método multiplicativo ou aditivo é arbitrária.

Neste trabalho utilizar-se-á o Método de Decomposição Aditivo Laspeyres Refinado proposto inicialmente por Sun (1998). Optou-se por este método, pois como pode ser visto na Tabela 2 ele cumpre todos os testes de Fundamentação Teórica além de ser um método facilmente adaptável. Outra importante qualidade atribuída ao método é sua facilidade de uso, compreensão e apresentação dos resultados.

3.2 Modelo de Cointegração

Nesta seção apresenta-se o modelo de Cointegração de Johansen, que permite analisar as inter-relações dinâmicas entre as variáveis econômicas. Essas inter-relações ocorrem entre o consumo de energia pela indústria, PIB industrial, preços ponderados de energia e intensidade energética da indústria, contudo para tanto, é necessário apresentar algumas definições úteis para aplicar o Método de Cointegração de Johansen.

3.2.1 Estacionariedade

Segundo Gujarati (2000), uma série é estacionária fracamente quando sua média é constante ao longo do tempo; sua variância também deve ser constante ao longo do tempo; e sua covariância indica que a autocorrelação entre dois valores de y_t , tomados a partir de dois períodos de tempo distintos, depende somente do intervalo de tempo entre esses dois valores e não de sua data, ou seja, $Cov(y_t, y_{t+s})$ é constante para todo t que não seja igual a s .

Caso um dos pressupostos mencionados não seja atendido, a série temporal analisada não é estacionária. A utilização de séries temporais não-estacionárias na análise de regressão clássica pode levar a um problema conhecido na literatura como “regressão espúria”, cuja principal característica é um elevado valor de R^2 , t – estatístico e uma estatística DW baixa, que podem parecer significativos, porém não têm nenhum significado econômico.

As séries temporais econômicas são na sua maioria não-estacionárias em nível. Contudo, séries não-estacionárias podem-se tornar estacionárias depois de uma ou mais diferenciações. Uma série temporal que precisa ser diferenciada “d” vezes para se tornar

estacionária é chamada integrada de ordem “d” ou I(d). Desse modo, uma série estacionária em nível é dita ser I(0).

Uma série estacionária é importante em economia, pois não faz sentido econômico trabalhar com séries que são explosivas com o passar do tempo. Utilizam-se testes de raiz unitária com a finalidade de testar a estacionariedade de uma série; o passo seguinte é testar a co-integração das séries de modo a utilizar o modelo VAR.

3.2.2 Teste de Raiz Unitária

Para determinar a estacionariedade das séries, um dos principais testes de raiz unitária é o Dickey-Fuller Aumentado (ADF). O teste de raiz unitária ADF apresenta-se da seguinte forma:

$$\nabla y_t = \alpha + \beta t + (\rho_1 - 1)y_{t-1} - \sum_{j=1}^{p-1} \rho_{j+1} \nabla y_{t-j} + e_t \quad (3.35)$$

Onde, α é o intercepto, t é a tendência, ∇ é o operador de diferença. O número de defasagens é determinado pelo menor valor do Critério de Schwarz, com a finalidade de eliminar a autocorrelação dos resíduos. O teste de raiz unitária testa a hipótese nula de presença de raiz unitária ($\rho=1$) contra a hipótese alternativa de que a série é estacionária ($\rho < 1$).

Para determinar o número de defasagens é utilizado o Critério de Informação de Akaike (AIC). O critério funciona da seguinte forma:

$$AIC = T \log |\sum| + 2N$$

Onde, $|\sum|$ é o determinante da matriz de variância e covariância dos resíduos e N é o número total de parâmetros estimados em todas as equações do sistema. No modelo VAR com p defasagens contendo n variáveis mais intercepto, o número total de parâmetros estimados em todas as equações corresponde a $N = n^2 p + n$, sendo que cada uma das n equações contém np defasagens mais intercepto.

O teste ADF apresenta alguns problemas que podem comprometer a eficiência do teste, Maddala e Kim (1998), argumentam que os testes de raiz unitária tradicionais têm baixo poder diante da possibilidade plausível de a série ser a realização de um processo estacionário em tendência. Os autores, por meio de experimentos de Monte Carlo concluiu também que o teste ADF apresenta distorções de tamanho na presença de erros de média móvel negativamente correlacionados.

Algumas metodologias no campo de teste de raiz unitária foram propostas recentemente cujo objetivo básico é procurar solucionar ou minimizar o problema de tamanho e poder dos testes mais comumente utilizados.

A fim de solucionar os problemas do teste ADF original relacionados a séries originárias de um processo estacionário em tendência, Elliot et al. (1996) propuseram uma simples modificação: retirar as variáveis explicativas relativas à tendência determinística (constante e coeficiente de tendência), através de uma diferenciação na série, para em seguida, aplicar a regressão identificadora de presença ou não de estacionariedade. Tal procedimento dá origem ao teste DF-GLS.

A transformação da série Y_t original em uma série Y_t^d (sem os efeitos dos termos determinísticos) depende de um valor a que representa um específico ponto alternativo contra o qual se deseja testar a hipótese nula. Como valor de a , os autores do teste recomendam o uso de $\alpha = \alpha^*$, onde:

$$\alpha^* = 1 + \frac{c^*}{T}$$

em que c^* assume, respectivamente, os valores, -7 e -13,5, para os modelos com constante e com constante e tendência linear.

Definido α^* , o passo seguinte da transformação é alterar a série original conforme segue:

$$d\left(\frac{Y_t}{a^*}\right) = \begin{cases} Y_t & \text{...se, } t=1 \\ Y_t - a^* Y_{t-1}, \dots \text{se, } t > 1 \end{cases}$$

em seguida, realiza-se a regressão por MQO de $d\left(\frac{Y_t}{a^*}\right)$ em função de $d\left(\frac{X_t}{a^*}\right)$, onde X_t contém os termos da constante ou da constante e da tendência. Portanto, X_t representa uma matriz contendo um vetor (termos da constante) ou dois vetores (termos da constante e da tendência), conforme o caso. A variável X_t referente ao intercepto e a tendência são calculadas, respectivamente, da seguinte forma: $X_{11} = 1$, para $t = 1$, e $X_{1t} = 1 - \alpha^*$, para $t = 2, \dots, T$; $X_{21} = 1$, para $t = 1$, e $X_{2t} = t - \alpha^* (t-1)$, para $t = 2, \dots, T$.

Utilizando-se as variáveis construídas, pode-se estimar a seguinte regressão:

$$d\left(\frac{Y_t}{a^*}\right) = d\left(\frac{X_t}{a^*}\right) \beta^* + \eta_t$$

Em que β^* identificam os parâmetros ou estimadores a serem obtidos por MQO e η_t é o termo de erro aleatório usual.

Estimado a equação acima, pode-se transformar Y_t em Y_t^d da seguinte forma:

$$Y_t^d = Y_t - X_t' \hat{\beta}^*$$

Finalmente o teste DF-GLS é aplicado utilizando a regressão:

$$\Delta Y_t^d = a_0 Y_{t-1}^d + a_1 \Delta Y_{t-1}^d + \dots + a_p \Delta Y_{t-p}^d + \varepsilon_t \quad (3.36)$$

Assim como no ADF original, a hipótese nula consiste na não estacionariedade, ou seja, $\rho = 1$, que equivale a $a_0 = 0$. A quantidade de termos de primeira diferença defasados pode ser definida conforme os critérios de AIC ou SBC.

No caso dos modelos que apresentam apenas o termo constante, os valores críticos do teste são aqueles definidos por Mackinnon (1996), os quais são também utilizados no ADF original. Para os modelos com termo constante e tendência, utilizam-se os valores que foram definidos em processos de simulação por Elliot et al. (1996).

3.2.3. Co-integração de Johansen⁷

Após constatação pelo teste de raiz unitária de que as séries não são estacionárias em nível, quer dizer, apresenta raiz unitárias, a etapa seguinte é identificar as relações de co-integração. Engle e Granger (1987) chegaram à conclusão de que uma combinação linear de duas ou mais séries não-estacionárias pode ser estacionária. Caso essa combinação exista, ela pode ser interpretada como relação de equilíbrio de longo prazo entre as variáveis.

Para que duas ou mais séries sejam co-integradas, elas devem ter a mesma ordem de integração, ou seja, se uma série for I(1), todas as demais também devem ser I(1). O teste de co-integração de Johansen (1988) baseia-se em um modelo VAR.

Caracterizando o modelo estimado neste trabalho, cujas variáveis endógenas são consumo de energia pela indústria (E), PIB industrial (Y), índice de preços de energia (P) e intensidade energética industrial (II), um VAR é representado pelo seguinte conjunto de equações lineares:

⁷ De acordo com Hamilton (1994).

$$\begin{aligned}
E_t &= \sum_{j=1}^k \theta_{11j} E_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{12j} Y_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{13j} P_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{14j} II_{t-j} + \varepsilon_{1,t} \\
Y_t &= \sum_{j=1}^k \theta_{21j} E_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{22j} Y_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{23j} P_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{24j} II_{t-j} + \varepsilon_{2,t} \\
P_t &= \sum_{j=1}^k \theta_{31j} E_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{32j} Y_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{33j} P_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{34j} II_{t-j} + \varepsilon_{3,t} \\
II_t &= \sum_{j=1}^k \theta_{41j} E_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{42j} Y_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{43j} P_{t-j} + \sum_{j=1}^k \theta_{44j} II_{t-j} + \varepsilon_{4,t}
\end{aligned} \tag{3.37}$$

em que j é o número de defasagens das variáveis; θ , parâmetros; e ε , erros.

Assumindo que x_t seja o vetor das variáveis E , Y , P e II , podem-se representar o sistema (3.37) em notação matricial da seguinte forma:

$$x_t = \Theta_1 x_{t-1} + \Theta_2 x_{t-2} + \dots + \Theta_p x_{t-p} + \varepsilon_t = \sum_{s=1}^p \Theta_s x_{t-s} + \varepsilon_t \tag{3.38}$$

em que x_t é o vetor ($k \times 1$) das variáveis do modelo; Θ_s são matrizes ($n \times n$), que relacionam os termos defasados das variáveis com os valores correntes destas; n é o número de variáveis; e ε_t é o vetor ($k \times 1$) dos erros.

A equação (3.38) pode ser representada com uso do operador de defasagem B :

$$(I - \Theta_1 B - \Theta_2 B^2 - \dots - \Theta_p B^p) x_t = \varepsilon_t \tag{3.39}$$

em que $B^m x_t = x_{t-m}$, para qualquer $1 < m < p$.

Após definição das defasagens incluídas no modelo, as equações (3.38) e (3.39) representam a forma definitiva do modelo.

Segundo Johansen (1988), pode-se adotar a seguinte forma para estimar as relações de co-integração:

$$\Delta x_t = \prod x_{t-1} + \sum_{s=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta x_{t-s} + \varepsilon_t \tag{3.40}$$

$$\text{em que } \prod = \sum_{s=2}^p (\Theta_s - 1) \quad \text{e} \quad \Gamma_i = - \sum_{j=i+1}^p \Theta_j$$

O posto da matriz Π é r , tal que $0 < r < k$; então haverá matrizes α e β , de dimensão $(r \times k)$, tal que $\Pi = \alpha\beta^T$ e que $\beta^T x_t$ seja estacionária. O posto r é o número de relações de co-integração, e cada coluna de β é um vetor de co-integração.

O método de Johansen consiste em estimar a matriz Π por máxima verossimilhança, na forma irrestrita. Em seguida, testa-se se as restrições decorrentes do posto de Π podem ser rejeitadas. A hipótese nula de que há r vetores de co-integração é testada por dois testes de razão de verossimilhança: teste do traço e teste do máximo autovalor.

Johansen e Juselius (1990) indicaram o teste do traço e o teste do autovalor máximo. Os valores críticos dos testes são utilizados para verificar a existência do número máximo de vetores de co-integração.

Segundo Enders (1995), o teste estatístico de traço é dado pela seguinte expressão algébrica:

$$P(r_0) = T \sum_{r_0+1}^n \ln(1 - \lambda_i) \quad (3.41)$$

em que $r_0 = 0, 1, \dots, k-1$, quando λ_i é o i -ésimo autovalor; P é a estatística de traço; e T é o número de observações. O teste do traço testa a seguinte hipótese:

$$H_0: r < r_0$$

$$H_A: r > r_0$$

Conforme Enders (1995), o teste do autovalor máximo é dado pela seguinte expressão algébrica:

$$P(r_0, r_0 + 1) = T \ln(1 - \lambda_{r_0+1}) \quad (3.42)$$

em que se testam as seguintes hipóteses:

$$H_0: r = r_0$$

$$H_A: r = r_0 + 1$$

3.2.4 Modelo Auto-Regressivo Vetorial (VAR)⁸

O modelo de Auto-Regressão Vetorial (VAR) é um importante instrumento de determinação dos efeitos dinâmicos de choques nas variáveis incluídas no modelo. Esse método tem sido bastante difundido em modelos de análises de séries temporais econômicas.

⁸ Esta seção é apresentada como complemento para uma maior compreensão da seção anterior relativa à Cointegração.

Esta metodologia (VAR) possibilita a obtenção de elasticidades de impulso para k períodos à frente. As elasticidades de impulso são uma forma de avaliar o comportamento das variáveis a partir de choques não-antecipados nas variáveis endógenas do sistema.

Um modelo VAR é representado na equação (3.38). De acordo com Ender (1995), o vetor x_t representa um processo estocástico estacionário com médias móveis, dado por:

$$x_t = A_0 \varepsilon_t + A_1 \varepsilon_{t-1} + A_2 \varepsilon_{t-2} + \dots \quad (3.43)$$

em que A_j são matrizes de ordem $(n \times n)$, para todo j ; A_0 é uma matriz identidade; e ε_{t-i} é o vetor $(n \times 1)$ de erros com defasagens i , para todo $i \geq 0$.

A equação (3.43) pode ser descrita na forma simplificada de operador de defasagens B :

$$x_t = A(B) \varepsilon_t \quad (3.44)$$

em que $A(B) = A_0 + A_1 B + A_2 B^2 + \dots$

O erro ε_t da equação (4.44) representa o erro de previsão de um período à frente, calculado com base nas informações disponíveis até $t-1$, e é dado pela expressão:

$$\varepsilon_t = x_t - E(x_t / x_{t-1}, x_{t-2}, \dots)$$

O erro de previsão de k períodos à frente é dado por $x_{t+k} - E(x_{t+k} / x_t, x_{t-p}, \dots)$.

Com as raízes do polinômio $A(B)$ todas maiores que 1, a equação (3.44) pode também ser escrita na forma auto-regressiva, ou seja, multiplicando-a por $A(B)^{-1}$, obtém-se:

$$A(B)^{-1} x_t = \varepsilon_t \quad (3.45)$$

A equação (3.45) é uma representação mais ampla de um processo auto-regressivo vetorial em relação à equação (3.39).

3.3 Fonte de Dados

Os dados utilizados na decomposição do consumo de energia e intensidade energética foram obtidos do banco de dados do Balanço Energético Nacional (BEN) disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Para tal, foram utilizados dados anuais de Produto Interno Bruto (PIB) Industrial para os anos de 1970 à 2008, estes dados também estão

disponíveis de forma desagregada, ou seja, o PIB industrial foi dividido em oito sub-grupos⁹, além disso, utilizou-se dados referente ao Consumo de Energia dos oito sub-grupos.

As séries de Consumo de Energia, PIB, Preços de Energia utilizados para estimar a demanda por energia na indústria foram retirados do BEN para os anos de 1970 à 2008. Por outro lado, as séries anuais de Capacidade Instalada Industrial e Formação Líquida de Capital Fixo na Indústria foram retiradas do banco de dados IPEADATA, referentes aos anos de 1970 à 2008.

Dessa forma, as equações a serem estimadas foram:

$$E_t = \alpha + \beta_1 Y_t + \beta_2 P_t^E + \beta_3 P_t^S + \beta_4 IIE_t + \beta_5 T + \varepsilon_t \quad (3.63)$$

em que, E_t é a demanda agregada de energia pela indústria, Y_t é o produto industrial ou valor agregado, P_t^E é um índice ponderado dos preços dos diferentes insumos energéticos utilizados pela indústria, P_t^S é o nível de salário médio da indústria e IIE_t é o índice de eficiência energética resultante da decomposição da intensidade energética.

$$IIE_t = \alpha + \alpha_1 CI_t + \alpha_2 C_t + \alpha_3 FL_t + \alpha_4 T + \varepsilon_t \quad (3.64)$$

em que, IIE_t é o índice de eficiência energética resultante da decomposição da intensidade energética, CI_t é a Utilização da Capacidade Instalada Industrial, C_t é a taxa de câmbio, FL_t é a Formação Líquida de Capital Fixo e T é a tendência.

⁹ Energo-Intensivos: Extrativa Mineral, Não Metálicos, Metalurgia, Química, Alimentos e Bebidas, Têxtil, Papel e Celulose. Não Energo-Intensivos: outros (mecânica, material elétrico, comunicação, material de transporte, madeira, mobiliário, borracha, farmacêutica, perfumes, sabões e velas, produtos de material plásticos, fumo, construção e diversos.

4 RESULTADOS

4.1 Decomposição do Consumo de Energia e Intensidade Energética

O método de decomposição utilizado neste trabalho foi proposto por Sun (1998), também chamado de método de Laspeyres Refinado. De acordo com a Tabela 2, este método cumpre todos os critérios segundo a teoria dos números índices, contudo é considerado como decomposição aditiva.

Outros benefícios do método podem ser enumerados como, por exemplo:

- i) Facilidade de entendimento, ou seja, é facilmente explicado e compreendido.
- ii) Para um número reduzido de parâmetros decompostos apresenta fórmula de cálculo de fácil compreensão.
- iii) Relativa facilidade de manuseio dos dados.

Mais detalhes deste método podem ser visto no capítulo 3 deste trabalho, ou em Sun (1998).

4.1.1 Decomposição do Consumo de Energia

Um dos principais objetivos deste trabalho é decompor o consumo de energia da indústria como exposto no Capítulo 3. Como denotado no referido capítulo, a decomposição do consumo de energia pode ser dividida em três efeitos distintos: Efeito Atividade, Efeito Estrutura e Efeito Intensidade.

A Figura 6 mostra a decomposição do consumo de energia pela indústria entre os anos de 1970 e 2008, dividido em grupos de cinco anos. Como pode ser visto, nos dois primeiros períodos (anos de 1970 – 1975 e 1976 – 1980) o Efeito Atividade representa a maior parte do acréscimo de energia consumida pela indústria nos períodos. O Efeito Estrutura teve uma pequena contribuição reduzindo o consumo de energia no primeiro grupo, porém ambos os Efeitos (Estrutura e Intensidade) não tiveram contribuição significativa no segundo período.

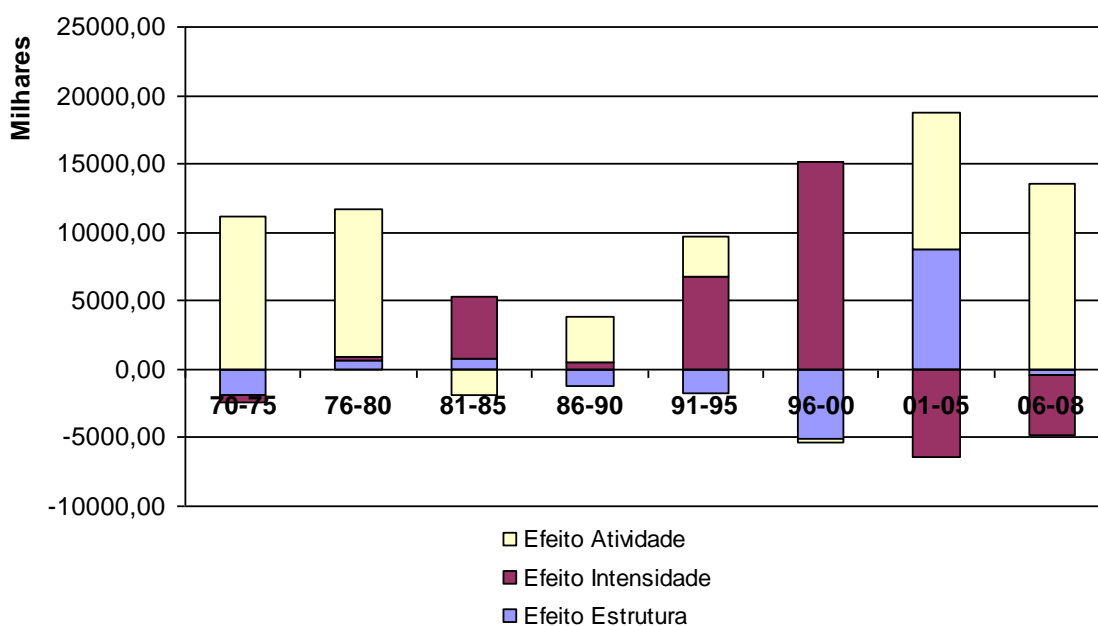


Figura 6 – Decomposição do Consumo de Energia na Indústria em tep entre 1970 – 2008
Fonte: Dados da pesquisa.

Os dois períodos se caracterizam pelo forte crescimento da indústria, porém algumas diferenças marcam os dois períodos. A partir de 1970 a taxa de crescimento do PIB brasileiro ultrapassa os dois dígitos como observam Gremaud, Vasconcellos e Toledo Jr. (2009), mas especificamente no primeiro período, a taxa média de crescimento do PIB industrial foi de 11,48% a.a. O forte crescimento se deve basicamente aos investimentos públicos em infraestrutura, fortalecimento das empresas estatais, particularmente Petrobras e Vale, já os setores de construção civil e bens de capital cresceram 15% a.a. e 18,1% a.a. respectivamente entre os anos de 1968 e 1973.

Machado e Schaeffer (1995) decompueram o consumo de energia da indústria de transformação e chegaram a resultados parecidos com os encontrados neste trabalho¹⁰, onde o Efeito Atividade é o maior responsável pelo aumento do consumo de energia no período de 1971 a 1975.

Motta e Araújo (1989) decompueram a intensidade energética do setor industrial para diferentes tipos de fontes de energia, concluindo que para o período 1971-1974 o efeito Atividade contribuiu com a maior parte do acréscimo no consumo de energia, explicada pela rápida aceleração do produto industrial, chamando a atenção que no período o preço relativo da energia estava em um patamar baixo.

¹⁰ Contudo, comparar os resultados obtidos em outros trabalhos não é trivial, uma vez que, os períodos analisados são diferentes, além disso, difere as metodologias e fonte de dados.

No final de 1974 lançou-se o II PND, cujo objetivo principal era manter o crescimento do PIB e o crescimento industrial, completando o modelo de crescimento do período passado de um padrão baseado no crescimento do setor de bens de consumo duráveis para um crescimento voltado ao setor produtor de meios de produção, ou seja, bens de capital e insumos básicos como aço, alumínio, zinco, minério de ferro entre outros (Gremaud, Vasconcellos e Toledo Jr., 2009).

Ainda de acordo com Gremaud, Vasconcellos e Toledo Jr. (2009), as taxas de crescimento do período foram menores que no Milagre Econômico, por outro lado a indústria em sua totalidade cresceu 35% entre os anos de 1974 e 1979, o setor metalúrgico cresceu, 45%, material elétrico, 49%, papel e papelão, 50%, químico, 48%, têxtil, 26% e por fim o setor de alimentos, 18%.

Diferentemente dos resultados encontrados neste trabalho, Machado e Schaeffer (1995) concluíram que o Efeito Intensidade contribuiu negativamente para o consumo de energia. Os autores argumentam que os setores energo-intensivos aumentaram sua participação relativa no uso total de energia, por outro lado, a eficiência energética contribuiu para reduzir o consumo.

Motta e Araújo (1989) concluem que para o período 1974-1979 o efeito Intensidade contribuiu com um aumento de 19% no consumo de energia, a principal justificativa é que no período a política de preços de derivados pouco se ajustou à nova realidade, na medida em que não se internalizou toda elevação no preço do petróleo. Dessa forma, segundo os autores, o efeito Atividade com acréscimo de 75% no consumo de energia, explica parte do crescimento industrial.

Park *et. al* (1993) fizeram uma análise de decomposição *cross-country* para 26 países entre os anos de 1973 a 1988, e chegaram a conclusão que entre os anos de 1973 e 1980 o Efeito Atividade foi responsável por 78,6% do acréscimo de consumo de energia e que o Efeito Intensidade contribuiu com 12,6% do acréscimo.

Observando a Figura 6, pode-se notar que o período entre os anos de 1981 e 1985 apresenta um consumo de energia relacionada ao aumento do Efeito Intensidade e ao mesmo tempo uma pequena redução relativa ao Efeito Atividade. A situação da economia brasileira se encontrava em situação adversa neste período. Foi necessário um profundo ajuste para corrigir o desequilíbrio externo criado pela opção de continuar crescendo mesmo após sucessivos choques do petróleo e adversidade externa. Entre os anos de 1980 e 1983 a produção industrial chegou a cair 14, 1% só retornando a um patamar superior ao ano de 1980 em 1986.

Machado e Schaeffer (1995) concluíram que, diferentemente do que ocorreu no período anterior, todos os Efeitos foram positivos, principalmente o Efeito Estrutura e Atividade, contudo o Efeito Intensidade também é positivo, ou seja, a eficiência energética passa a decrescer, parecendo indicar que as tecnologias utilizadas nos processos produtivos passam a ser obsoletas, ou mais provavelmente, o valor médio de troca da indústria de transformação decresce no período.

Motta e Araújo (1989) argumentam que entre o período de 1979 a 1985 caracteriza-se por uma política energética mais ativa, propondo preços mais realistas para os derivados de petróleo e incentivando substituições de fontes energéticas. O resultado destas políticas é que o Efeito Intensidade contribuiu para a redução do consumo de energia no período segundo os autores. Resultados estes não corroboram os encontrados neste trabalho.

O período seguinte, 1986 a 1990, caracteriza-se por uma pequena elevação do Efeito Atividade, explicado pelo crescimento industrial de 1986, mantido o patamar até meados de 89. Tal crescimento deve-se aos sucessivos planos econômicos cujos objetivos eram controlar a inflação, contudo, geravam expansão de demanda e antecipação de compras.

Park et. al (1993) sugeriram que o Efeito Intensidade respondeu por 95,3% do acréscimo no consumo de energia no período 1980 a 1988, o que vai ao encontro com os resultados encontrados neste trabalho. Por outro lado, o Efeito Atividade responde negativamente, com -4,7%, e o Efeito Estrutura por acréscimo de 10%. Machado e Schaeffer (1995) argumentam que as mesmas tendências verificadas no período anterior se repetem, porém em intensidade menor.

Entre os anos de 1989 e 1992, as altas taxas de inflação e o confisco de liquidez fizeram o produto industrial cair 11,8%, contudo a partir de 1993 quando o vice-presidente Itamar Franco assume a presidência, juntamente com o ministro da fazenda Fernando Henrique Cardoso, melhora-se as contas públicas e começa a implantação de um novo plano econômico – o Real – o PIB industrial volta a crescer (Gremaud, Vasconcellos e Toledo Jr., 2009).

O período de 1991 a 1995 caracteriza-se pelo forte Efeito Intensidade, ou seja, a indústria passa a utilizar mais energia para a produção da mesma quantidade de produto, diminuindo assim a eficiência energética do setor. Enquanto que a taxa de investimento em relação ao PIB foi de 22,17% entre os anos de 85 a 90, a taxa caiu para uma média de 18,97%

entre os anos de 91 a 95, o que explica em partes o aumento do consumo de energia relativo ao Efeito Intensidade¹¹.

O Efeito Intensidade foi o maior responsável pelo acréscimo no consumo de energia entre os anos de 1996 a 2000. Neste período, a taxa de investimento da economia foi de apenas 16,73% a.a. em média, uma das mais baixas taxas de investimento da história recente do país. Como pode ser visto na Figura 7, entre os anos de 1987 a 2003 o nível de consumo de energia relativo ao Efeito Atividade praticamente ficou inalterado, o que pode ser entendido como estagnação na produção industrial do período.

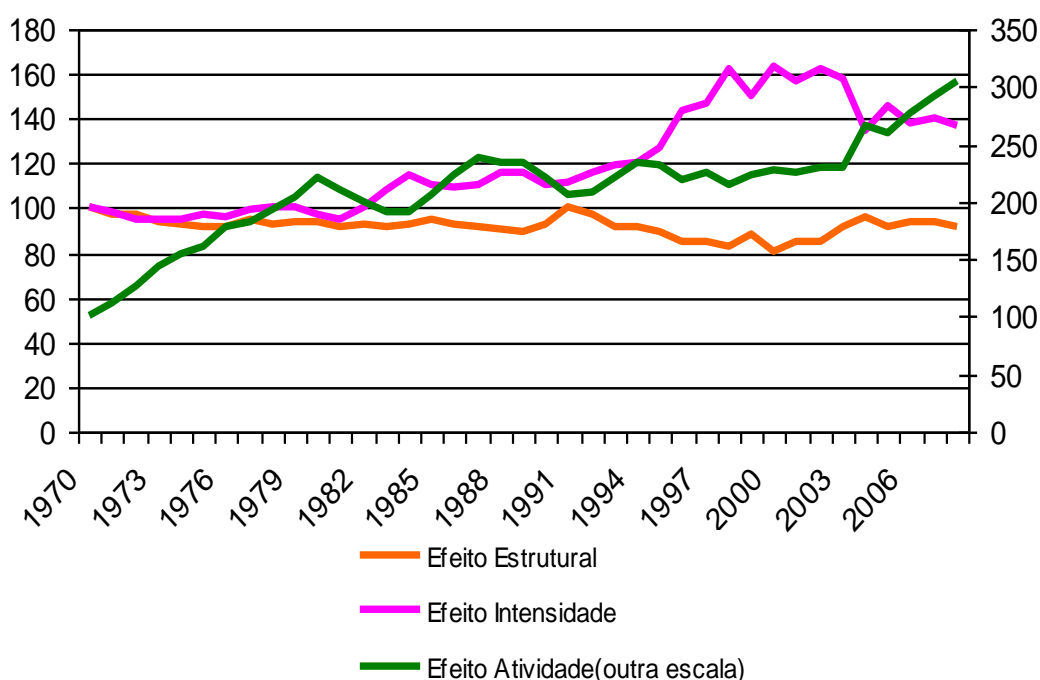


Figura 7 – Decomposição do Consumo de Energia na Indústria em índice, entre 1970 – 2008
Fonte: Dados da pesquisa.

Neste mesmo período, o Efeito Estrutural atua reduzindo o consumo de energia, ou seja, os setores energo-intensivos perdem participação na produção da indústria em relação aos setores não energo-intensivos. É justamente entre os anos de 1996 e 2000 que os setores industriais classificados como não energo-intensivos obtiveram maior participação no produto industrial, variando entre 62% e 65% da produção industrial.

Como podem ser constatados nas Figuras 6 e 7, a partir de 2003 a queda do Efeito Intensidade volta a contribuir para a redução no consumo de energia na indústria ao mesmo tempo, o Efeito Atividade e Estrutural contribuem para o acréscimo no consumo em especial a partir de 2004. Este resultado sugere que, com o crescimento industrial visualizado a partir

¹¹ Mais detalhes a respeito da influência do investimento sobre o Efeito Intensidade pode ser visto no item 4.3.

do Efeito Atividade, os setores energo-intensivos crescem a uma taxa superior aos setores não energo-intensivos, evidência sugerida pelo aumento do consumo de energia mediante ao Efeito Estrutural.

De um modo geral entre os anos de 2001 a 2008 a indústria aumentou bastante o consumo de energia relativo ao aumento da produção como sugere o Efeito Atividade. O Efeito Estrutural teve participação importante no primeiro período, porém no segundo não apresentou importância relativa: por outro lado, o Efeito Intensidade contribuiu bastante nos dois períodos para a redução do consumo de energia. Vale notar que os dois períodos podem ser analisados de forma diferente.

Com destaque Pires et. al (2002), em maio de 2001, cálculos da Operadora Nacional do Sistema (ONS) indicavam a necessidade de redução imediata de 20% do consumo de energia elétrica no país decorrente do grave período de estiagem e da falta de investimento e planejamento no setor elétrico.

Ainda segundo os autores, as metas de redução de consumo foram de 20% para consumidores residências com consumo superior a 100 KWh/mês, 20% para os consumidores comerciais e de 20% a 25% para os consumidores industriais, ou seja, a indústria precisou fazer um esforço maior para contribuir para o racionamento.

Como as indústrias foram obrigadas a aderir ao racionamento ao mesmo tempo em que os preços da energia elétrica ficaram mais caros, é de se esperar que os investimentos na economia de energia e também na eficiência energética perdurassem por todo o período, principalmente nos setores onde a participação da energia elétrica como insumo energético é relativamente maior como, por exemplo: não-ferrosos (56,3%), têxtil (55,6%), outras indústrias (50%), ferro-liga (40,1%), mineração e pelletização (28,9%) e química (26,4%)¹².

A partir de 2004, a produção industrial se destaca, como pode ser visto pelo Efeito Atividade na Figura 7, ao mesmo tempo o Efeito Intensidade contribui para redução do consumo de energia, entre os anos de 2004 e 2008 o PIB industrial cresceu a uma taxa de 6,5% a.a. e a taxa de investimento de 17% a.a..

4.1.2 Decomposição da Intensidade Energética

A decomposição da Intensidade Energética utiliza a mesma metodologia da decomposição do consumo de energia, porém como pode ser visto no Capítulo 3 está

decomposição admite apenas dois efeitos: Efeito Intensidade e Efeito Estrutural. A decomposição será feita a partir dos dados mostrados na Figura 4.

Como pode ser visto na Figura 8, os dois primeiros períodos, entre os anos de 1970 e 1980, o Efeito Estrutural foi o mais importante no primeiro e próximo de zero no segundo, o mesmo pode ser dito do Efeito Intensidade. Algo próximo a este resultado foi visto na Figura 6, ou seja, as mudanças de peso relativas entre os setores industriais explicam boa parte da variação de intensidade neste período.

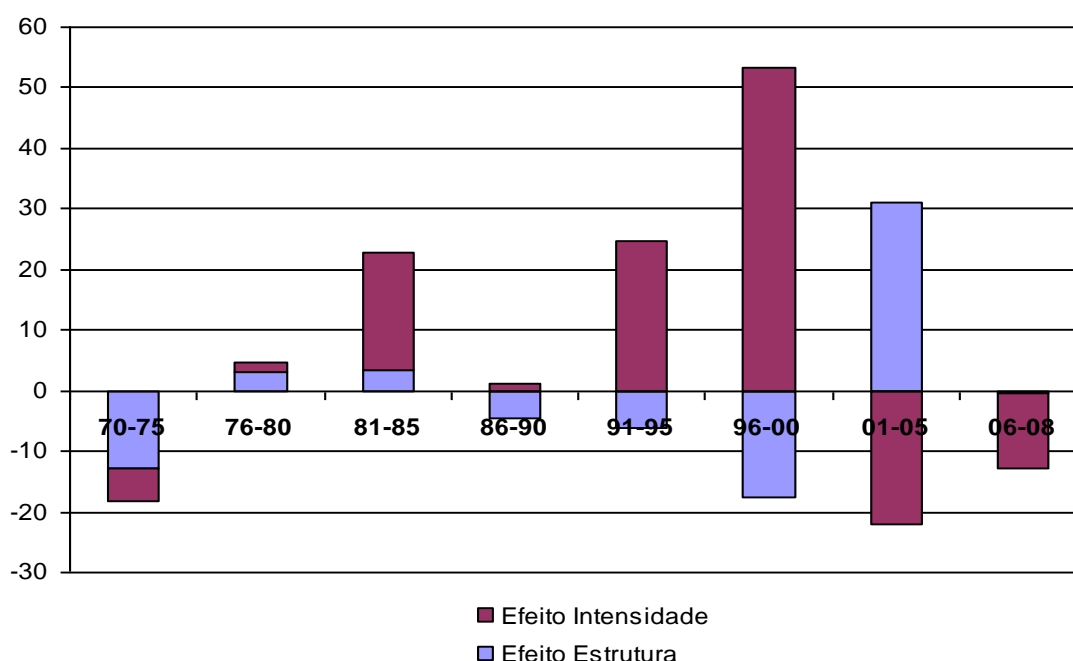


Figura 8 – Decomposição da Intensidade Energética na Indústria em tep/milhões de dólares, entre 1970 – 2008
Fonte: Dados da Pesquisa.

No período entre 1981 e 1990, o Efeito Intensidade contribuiu significativamente para o aumento da intensidade energética, em especial, entre os anos de 1981 e 1985. A Figura 8 mostra que no primeiro período, a taxa de investimento caiu sucessivamente, contudo a partir de 1986 a taxa volta a subir o que explica em partes a estabilidade da intensidade energética no período.

Henriques Jr. e Schaeffer (1996) analisaram o uso de energia na indústria brasileira em especial os indicadores de intensidade e eficiência energética, ao mesmo tempo compararam os resultados com Estados Unidos, Japão e França entre o período de 1975 e 1990. Os autores observaram que nos três países desenvolvidos o Efeito intensidade teve um papel

¹² Dados obtidos para o ano de 2008 junto ao BEN (2008).

importante na redução da intensidade energética, contudo no Brasil tal efeito contribuiu com um aumento de 1% na intensidade energética.

Ainda segundo os autores, o fator preponderante sobre a intensidade foi o Efeito Estrutural, contribuindo com 24,5% de aumento, com relação aos demais países, tanto nos Estados Unidos quanto no Japão o Efeito Estrutural contribuiu para redução da intensidade.

Worrell et. al (1997) estudaram a intensidade energética na indústria do aço e do ferro entre 1980 e 1991 para um conjunto de sete países: Brasil, China, França, Alemanha, Japão, Polônia e Estados Unidos. Os autores chegaram à conclusão que apenas Brasil e China aumentaram a intensidade energética mediante ao Efeito Estrutural, contudo em relação ao Efeito Intensidade, estes países fazem parte do grupo que reduziu a intensidade energética.

A partir de 1991, o Efeito Intensidade, como pode ser visto na Figura 9, volta a ganhar importância, contribuindo para o aumento da intensidade energética no setor industrial, como pode ser visto nas Figuras 6 e 7. Este efeito é ainda mais intenso no período seguinte, entre os anos de 1996 a 2000.

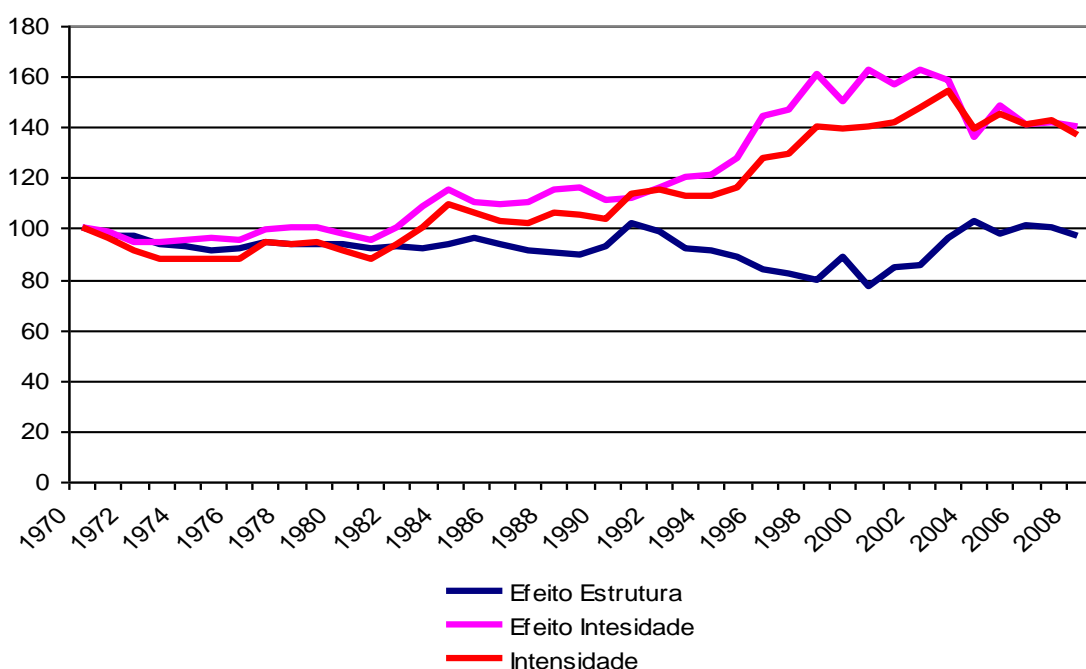


Figura 9 – Decomposição da Intensidade Energética na Indústria em índice, entre 1970 – 2008

Fonte: Dados da Pesquisa.

Henrique Jr. e Schaeffer (1996) argumentam que o aumento do Efeito Intensidade não significa necessariamente um retrocesso tecnológico ou uma redução da eficiência energética

nos seus processos, mas pode indicar que ocorreu uma mudança dentro dos subsetores específicos da indústria no sentido de um aumento no uso de energia por unidade de valor econômico produzida.

A Figura 10 mostra a distribuição das intensidades energéticas nos diferentes setores industriais classificados como energo-intensivos. A maior parte dos setores mostrados na Figura apresenta tendência de aumento da intensidade, o que explica o comportamento do Efeito Intensidade na Figura 6.

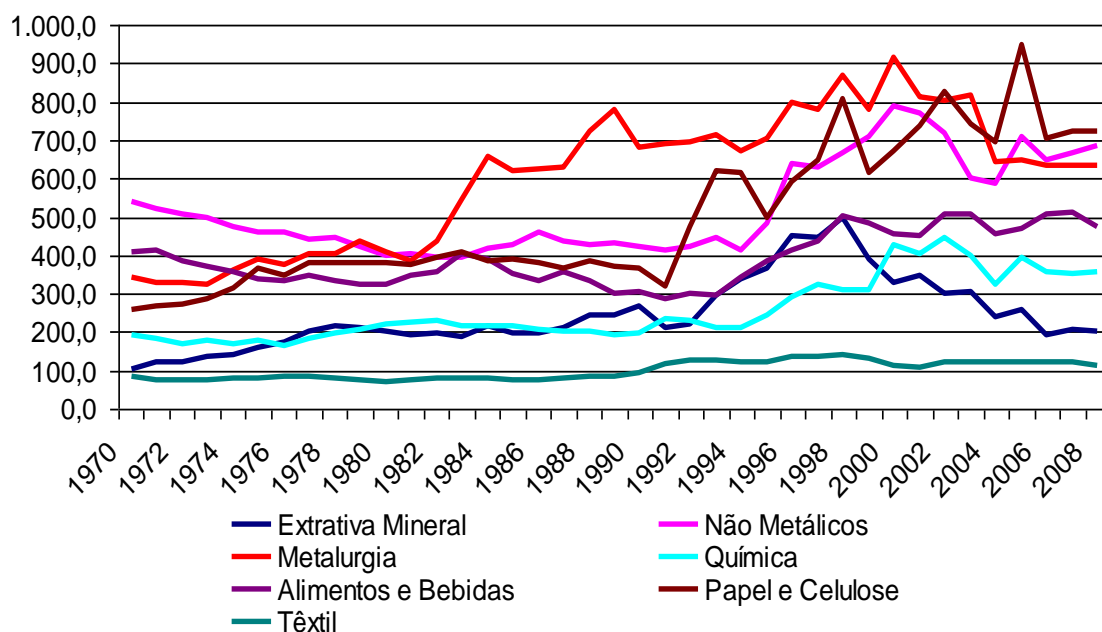


Figura 10 – Intensidade Energética nos principais setores Energo-Intensivos industriais, entre 1970 e 2008

Fonte de dados: BEN (2008).

A partir de 2001, o Efeito Intensidade contribuiu para redução da intensidade energética, contudo o Efeito Estrutural influencia de forma oposta, ou seja, contribuindo para o aumento da intensidade, de acordo com a Figura 6 e 7. O mesmo resultado pode ser visto na Figura 10, em que a maior parte dos setores passam a reduzir a intensidade energética a partir de 2001, em especial, metalurgia, não metálicos e extrativa mineral.

De modo geral, o comportamento da Intensidade Energética na indústria decomposta em Efeito Intensidade e Estrutural denotam a perda de Eficiência Energética em todos os setores industriais pesquisados, o que nos leva a tentar encontrar os principais determinantes da perda de eficiência energética. Para tanto, inicialmente, determinar-se-á a influência do Efeito Intensidade, mostrado na Figura 6, sobre a demanda de energia industrial. Logo em

seguida, buscar-se-á determinar o impacto do Investimento e da Utilização da Capacidade Instalada para explicar o comportamento do Efeito Intensidade demonstrado na Figura 7.

4.2 Função de Demanda de Energia na Indústria Brasileira

Este trabalho propõe estimar uma equação de demanda de energia para a indústria brasileira utilizando um índice de eficiência energética obtido através da decomposição da intensidade energética industrial. A equação a ser estimada é:

$$E_t = f(Y_t, P_t, P_t^S, IIE_t) \quad (4.1)$$

Já mostrada anteriormente sob a expressão (2.27), em que, E_t é a demanda agregada de energia pela indústria, Y_t é o produto industrial ou valor agregado, P_t é um índice ponderado dos preços dos diferentes insumos energéticos utilizados pela indústria, P_t^S é o nível de salário médio da indústria e IIE_t é o índice de intensidade energética. A estimação foi feita utilizando o Modelo de Cointegração de acordo com o procedimento descrito em Johansen (1988).

Para tanto, inicialmente deve-se determinar se os processos geradores das séries são estacionários ou não, para tal, utilizou-se o teste de raiz unitária de Dickey-Fuller Aumentado ou ADF. O procedimento para detectar raiz unitária através do teste ADF foi baseado em Enders (1995).

A Tabela 3a apresenta o teste de Raiz Unitária ADF para as séries de Consumo de Energia Industrial, PIB Industrial, Índice de Preços ponderados de Energia, Salários médios na Indústria e Índice do Efeito Intensidade obtido a partir da decomposição da Intensidade Energética.

Tabela 3a – Teste de Raiz Unitária ADF para as séries Consumo de Energia Industrial, PIB Industrial, Preços ponderados de energia, Salários na indústria e Intensidade Energética

	Constante e Tendência τ		Constante τ_{μ}		Sem Constante e Tendência τ		Primeira diferença	
	Estatística de Teste*	p-Valor	Estatística de Teste*	p-Valor	Estatística de Teste*	p-Valor	Estatística de Teste*	p-Valor
Cons-Ener	-3,34	0,08	-1,54	0,50	5,45	1,00	-3,06	0,00
Pib-Ind	-2,49	0,33	-1,55	0,49	2,53	0,99	-4,34	0,00
Preço-Ind	-2,15	0,50	-0,92	0,77	1,48	0,96	-5,32	0,00
Salário	-3,63	0,04	-0,68	0,83	-0,78	0,37	-4,13	0,00
Intensidade	-4,06	0,02	-1,25	0,64	1,09	0,92	-6,57	0,00

Fonte: Dados da pesquisa. * Valores críticos: MacKinnon (1996).

Utilizando o procedimento proposto por Enders (1995), constata-se que partindo de uma especificação mais geral, ou seja, com tendência e constante, a série Consumo de Energia (Cons-Ener) é estacionária a 10%, contudo utiliza-se neste trabalho critério mais robusto no sentido de não rejeitar estacionariedade ao nível de significância abaixo de 5%, rejeita-se a estacionariedade da série. As séries PIB Industrial (Pib-Ind) e Preços ponderados de Energia Industrial (Preço-Ind) também são não estacionárias pelos mesmos critérios utilizados acima. Por outro lado, as séries Salário e Intensidade são estacionárias ao nível de 5%.

Agora utilizando uma especificação com constante no teste ADF, constata-se que nenhuma das séries anteriormente não-estacionárias se mostraram estacionárias. O mesmo vale para uma especificação sem constante e sem tendência. Todavia, com ressaltam Campbell e Perron (1991), se duas ou mais séries são integradas de mesma ordem entre todas as variáveis, pode-se relacioná-las em um modelo econômico, em que variáveis não estacionárias e estacionárias possam ser testadas conjuntamente pela hipótese de Cointegração.

Dessa forma, testou-se as séries PIB Industrial (Pib-Ind) e Preços ponderados de Energia Industrial (Preço-Ind) em primeira diferença para constatar se estas são estacionárias de primeira ordem, fato este constatado.

Neste trabalho é realizado um segundo teste de raiz unitária com um poder de teste maior, ou seja, com uma capacidade maior de rejeitar uma falsa hipótese nula (a série em questão tem uma raiz unitária) para que tenhamos mais confiança para aplicar o teste de Cointegração. O teste utilizado será o DF-GLS proposta por Elliot *et al.* (1996).

No caso dos modelos que apresentam apenas o termo constante, os valores críticos do teste são aqueles definidos em Mackinnon (1996), os quais são também utilizados no ADF

original. Para os modelos com termo constante e tendência, utilizam-se os valores que foram definidos em processos de simulação por Elliot *et al.* (1996).

A Tabela 3b apresenta o teste de Raiz Unitária DF-GLS para as séries de Consumo de Energia Industrial, PIB Industrial, Índice de Preços ponderados de Energia, Salários médios na Indústria e Índice do Efeito Intensidade obtido a partir da decomposição da Intensidade Energética.

Tabela 3b – Teste de Raiz Unitária DF-GLS para as séries Consumo de Energia Industrial, PIB Industrial, Preços ponderados de energia, Salários na indústria e Intensidade Energética

	Constante e Tendência ¹	Constante ²	Primeira diferença ²
	Estatística de Teste		
Cons-Ener	-2,45	0,43	-4,15*
Pib-Ind	-1,96	0,26	-4,36*
Preço-Ind	-2,24	-0,22	-5,50*
Salário	-2,95***	-1,22	-3,68*
Intensidade	-3,81*	-0,72	-6,84*

Valores Críticos: ¹ *1% = -3,77, **5% = -3,19 e ***10% = -2,89. ² *1% = -2,63, **5% = -1,95 e ***10% = -1,61. Fonte: Dados da pesquisa.

As séries Cons-Ener, PIB-Ind e Preço-Ind não se mostraram estacionárias ao nível de significância de 10% considerando o modelo com Constante e Tendência, por outro lado, a série Salário se mostrou estacionária ao nível de 10% e a série Intensidade se mostrou estacionária ao nível de 1%, o que diferencia os resultados obtidos pelo teste DF-GLS do teste ADF é a série Cons-Ener que no teste ADF se mostrou significativa ao nível de 10%, fato não confirmado pelo teste DF-GLS.

Considerando o modelo com Constante, nenhuma série se mostrou estacionária. Por outro lado, utilizando o teste em primeira diferença, todas as séries se mostraram estacionárias em primeira diferença, corroborando assim os resultados obtidos através do teste ADF.

Após o teste de Raiz Unitária é necessário à correta determinação do número de defasagens a serem incluídos na especificação do modelo VAR que será utilizado no procedimento de Johansen (1988) para testar Cointegração. Para determinar o número de defasagens foram adotados os critérios de Schwarz (SC) e de Akaike (AIC).

A Tabela 4 apresenta os resultados de acordo com cada critério.

Tabela 4 – Estrutura de defasagem do modelo VAR(p)

Lag	AIC	SC
0	-8,147	-7,915
1	-14,193	-12,805*
2	-13,868	-11,324
3	-15,461*	-11,761

Fonte: Dados da pesquisa.

Como o número de observações é reduzido¹³, procedeu-se o teste de defasagens com um máximo de 3 lags. De acordo com o critério de *Akaike*, o número o ótimo que minimiza tal critério são 3 lags, por outro lado, o Critério de *Schwarz* indica apenas uma defasagem. Optou-se pelo uso do critério de *Schwarz*, pois este é reconhecido na literatura com mais parcimonioso.

A partir da correta especificação do modelo VAR, realizou-se o teste proposto por Johansen (1988) e Johansen e Juselius (1990), com o objetivo de encontrar, caso exista, relações de longo prazo entre as variáveis, ou seja, os vetores de cointegração. Para tanto, utilizou-se o teste do traço.

A Tabela 5 apresenta os resultados do teste do traço. Como o teste é realizado utilizando as variáveis em primeira diferença (equação 3.40), tem-se de diminuir o número de defasagens especificadas pelos critérios anteriores em uma unidade. Como o critério de *Schwarz* indicou apenas um lag, o teste de cointegração será realizado sem nenhum lag.

Tabela 5 – Teste de Cointegração entre as séries: Consumo de Energia Industrial, PIB Industrial, Preços ponderados de energia, Salários na indústria e Intensidade Energética, assumindo tendência determinística linear, sem nenhum lag

	Autovalor	Traço	Valor Crítico a 5%	Prob.
Nenhum	0,610253	91,97375	88,80380	0,0289
1 Vetor*	0,475781	60,87926	63,87610	0,0871
2 Vetores	0,445754	39,56634	42,91525	0,1040
3 Vetores	0,299512	20,09152	25,87211	0,2213
4 Vetores	0,223420	8,344245	12,51798	0,2248

Fonte: Dados da Pesquisa.

De acordo com o teste do traço, a hipótese nula de que o posto da matriz de cointegração é nulo, é rejeitada a 5% como mostrado na Tabela 5, portanto há no mínimo um vetor de cointegração que estabelece as relações de longo prazo entre as variáveis. Contudo, o

¹³ Os dados compreendem o período de 1970 a 2008.

teste não rejeita a hipótese nula de que há um ou menos vetores de cointegração, portanto, o teste do traço indica que, para o nível de significância estabelecido, há um vetor de cointegração entre as variáveis analisadas.

O passo seguinte é justamente determinar o vetor de cointegração que garante que as variáveis caminhem juntas a longo prazo. Esta relação está demonstrada na Tabela 6, que também apresenta o nível de significância dos parâmetros estimados.

Tabela 6 – Determinantes da Demanda de Energia pela Indústria

CONS-ENER	PIB-IND	PREÇO-ENER	SALÁRIO	INTENSIDADE	TENDÊNCIA
1,000000	0,954551	-0,079369	0,297736	0,088057	0,018563
Desvio	(0,10367)	(0,02253)	(0,09465)	(0,04884)	(0,00385)
t	[-9,20724]*	[3,52215]*	[-1,80302]***	[-3,14564]*	[-4,82581]*

* significativo a 1%, ** significativo a 5% e *** significativo a 10%.

Fonte: Dados da Pesquisa.

Os resultados demonstrados na Tabela 6 podem ser melhor visualizados na equação abaixo.

$$E_t = 0,95PIB_t - 0,079P_t^E + 0,297INT_t + 0,088P_t^S + 0,018T_t \quad (4.2)$$

(9,207)* (-3,522)* (3,145)* (1,803)*** (4,825)*

De acordo com a equação (4.2) um aumento de 1% no PIB industrial implica um aumento de 0,95% no consumo de energia, ou seja, a elasticidade renda da demanda por energia se mostrou inelástica, porém próximo à unidade. Com relação à significância do parâmetro, este se mostrou significativo a 1%.

Schmidt e Lima (2004) estimaram a demanda por energia elétrica para a indústria brasileira entre o período de 1969 e 1999, chegaram a conclusão que a elasticidade renda da demanda por energia foi de 1,718, contudo, a energia elétrica é apenas uma das fontes de energia consideradas nesta tese, de modo que, a energia elétrica contribui com aproximadamente 20% da oferta energética industrial de acordo com a Tabela 1.

Um trabalho parecido foi realizado por Mattos (2005) em que o autor estimou a demanda por energia elétrica industrial no Brasil entre os períodos de 1974 a 2002, o autor conclui que a elasticidade renda da demanda por energia elétrica é de 1,588, próxima portanto das estimativas realizadas por Schmidt e Lima (2004).

Com relação à elasticidade preço da demanda de energia, um aumento no preço ponderado da energia em 1% implica na redução de 0,079% no consumo de energia pela indústria. Com relação à significância do parâmetro, a variável se mostrou significativa a 1%.

Comparando com outros trabalhos, porém utilizando como fonte, a energia elétrica, Schmidt e Lima (2004) encontraram -0,128 e Mattos (2005) encontrou -0,489 para a elasticidade preço da demanda.

Todavia, esperava-se que os resultados obtidos neste trabalho fossem um pouco mais expressivos, uma das possibilidades é que como o índice de preços utilizados é uma ponderação de todas as fontes de energia utilizadas pela indústria, com a agregação perdeu-se o efeito substituição característico entre as fontes, mesmo que esse efeito seja pequeno, pois uma unidade fabril não pode facilmente substituir uma fonte de energia por outro a custos que não sejam consideráveis.

A elasticidade preço-cruzada, representada neste trabalho pelo nível de salários pagos na indústria, apresentou sinal de acordo com a teoria, um aumento de 1% no nível de salários aumenta o consumo de energia em 0,088% como mostrado na Equação (4.2), já que um aumento no nível de salários torna o investimento em máquinas mais vantajoso nos setores onde é possível fazer tal substituição. O parâmetro estimado se mostrou significativo ao nível de 10%.

Com relação à elasticidade intensidade de energia, constata-se que um aumento de 1% do Efeito Intensidade tem como resultado uma elevação de 0,297% no consumo de energia pela indústria, ou seja, reduzir a intensidade energética significa cortar quase um terço do consumo de energia em proporção à redução. Com relação à magnitude do parâmetro, não é possível fazer comparações na literatura, especialmente à demanda de energia industrial.

O resultado encontrado acima tem algumas implicações importantes. Supondo que todo o parque industrial brasileiro se limitasse a apenas uma indústria, então não haveria a necessidade de decompor a intensidade energética entre efeitos Atividade, Estrutural e Intensidade, bastando à análise da equação (1.1) em que a intensidade energética é a razão entre o consumo de energia e a produção de bens e serviços a ela associada. Neste caso, um aumento de 1% na intensidade deveria ser acompanhado de um aumento de mesma proporção do consumo de energia caso a produção não se alterasse.

Tomando os resultados obtidos na equação (4.2), uma elevação de 1% na intensidade implicaria um aumento de 0,297% no consumo de energia se a produção se reduzisse 0,696%, desconsiderando o efeito estrutural por causa de sua própria definição, alteração na participação de diferentes setores industriais, um aumento do efeito Intensidade está associada

a perda de eficiência na utilização da energia, portanto um aumento no custo marginal do produto relativo a um maior gasto com energia, dessa forma a produção deve ser reduzida para que condições de oferta e demanda seja restabelecidas.

Porém, como os resultados encontrados na equação (4.2) são relativos a todo parque industrial brasileiro, o efeito Estrutural também deve ser levado em consideração na análise entre a relação dos três efeitos.

Todavia, Haas e Chipper (1998) estimaram a elasticidade intensidade da demanda de energia residencial para os principais países da OECD, entre os anos de 1970 e 1993. Os autores chegaram à conclusão que a elasticidade intensidade da demanda pode variar entre 0,26 para a Suécia, 0,46 para o Japão, 0,53 para os EUA ou de 0,87 no caso da França.

Resultados específicos para a indústria não foram encontrados para que pudessem servir de comparação, contudo fica como proposta para futuras pesquisas a corroboração dos resultados encontrados neste trabalho, ou mesmo aplicações a outros países.

Determinar as variáveis que influenciam o comportamento da Eficiência Energética na indústria passa a ser um dos fatores primordiais para a redução do consumo energético, que além de reduzir os custos de produção, ainda tem um caráter ambiental de suma importância, que vem sendo debatido exaustivamente pela sociedade.

A próxima seção tem como objetivo introduzir a discussão a respeito dos determinantes da Eficiência Energética, ou seja, a redução da intensidade na indústria brasileira.

4.3 Determinantes da Intensidade Energética na Indústria

Entender a dinâmica da Intensidade Energética Industrial requer identificar os principais determinantes da produção industrial e do consumo de energia. A Formação Líquida de Capital Fixo – Máquinas e Equipamentos industriais - foi selecionada por representar o estoque de capital, descontado a depreciação, disponível para produção industrial; os dados foram obtidos junto ao IPEADATA. A Utilização da Capacidade Instalada na Indústria foi selecionada por ser um indicador de excesso ou de subutilização do parque industrial, já que, em geral, as plantas industriais são construídas de acordo com um nível ótimo de produção, qualquer nível acima ou abaixo do ótimo pode interferir na eficiência ou produtividade dos insumos. A Figura 11 mostra mais detalhes.

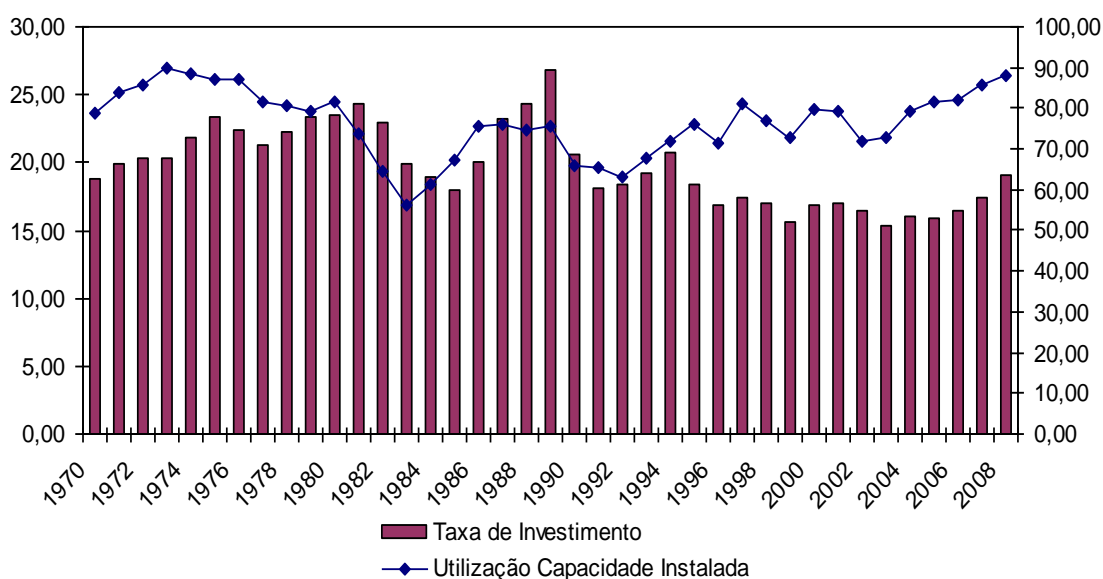


Figura 11 – Taxa de Investimento em proporção do PIB e Taxa de Utilização da Capacidade Instalada na Indústria
Fonte: IPEADATA.

Ao longo do período analisado neste trabalho, a Taxa de Investimento vem apresentando variações abruptas de acordo com os ciclos econômicos, não necessariamente coincidindo com períodos de maior crescimento. Por exemplo, a década de 1980 e início de 1990 foram caracterizadas por altas taxas de investimento, porém boa parte dos investimentos foi canalizada para setores exportadores, pois o país necessitava de fortes superávits comerciais.

A partir de 1992, a Taxa de Investimento não ultrapassa o patamar de 20% do PIB, permanecendo assim por toda década de 1990 e 2000, contudo um pequeno crescimento na Taxa de Investimento vem se observando nos últimos anos, a partir de 2005 e 2006.

Com relação à Utilização da Capacidade Instalada, observa-se que a partir de 1993, com a Taxa de Investimento relativamente baixa, o aumento de produção sustentou-se através da elevação da Utilização da Capacidade Instalada, e que nos últimos anos este indicador vem crescendo de forma consistente, ou seja, os investimentos não estão sendo suficientes para compensar o forte crescimento industrial.

Portanto, a utilização da Taxa de Investimento e a Capacidade Instalada na determinação da intensidade energética visam identificar a influência destes indicadores na Eficiência Energética Industrial.

Outra variável importante na determinação da intensidade energética é a Taxa de Câmbio Real, obtida a partir do diferencial de inflação brasileira e americana, ou seja, IGP-DI

e IPA. A maior parte dos setores energo-intensivos industriais também se caracterizam pela forte abertura ao comércio exterior. Segundo Ribeiro e Pourchet (2002), entre os anos de 1999 e 2001, o setor Extrativo Mineral exportou 67,9% da produção em média, o setor Metalurgia de não ferrosos, 22,7%, Elementos Químicos, 9,4%, Têxtil, 9%, Papel e Celulose, 12,3% e Siderurgia 16,2%. Por outro lado, estes mesmos setores também se caracterizam por altos coeficientes de importação.

Desse modo, a Taxa de Câmbio é um dos principais determinantes do comportamento dos coeficientes de importação e exportação. De acordo com Ribeiro e Pouchet (2002), uma desvalorização real do câmbio deveria levar, *ceteris paribus*, a um aumento do coeficiente de exportação e uma redução do coeficiente de penetração de importação devido ao encarecimento relativo dos produtos importados.

O Coeficiente de Abertura Líquida é a diferença entre o coeficiente de exportação e o coeficiente de insumos importados, que é o valor dos insumos importados utilizados na produção dividido pelo valor da produção doméstica. Assim, a Tabela 7 denota os Coeficientes de Abertura Líquida para setores selecionados.

Tabela 7 – Coeficiente de Abertura Líquida setores e períodos selecionados

	1990-1993	1994-1998	1999-2001
Siderurgia	16,3	11,2	10,6
Papel e Celulose	7,2	6,2	7,9
Metalurgia não ferrosos	14,9	10,4	8,9
Químicos Diversos	-4,9	-7,0	-11,0
Têxtil	3,5	-2,3	-0,8

Fonte: Ribeiro e Pourchet (2002).

A partir da Tabela 7 pode-se perceber que os setores de Siderurgia e Metalurgia não ferrosos, que compõe o setor de Metalurgia neste trabalho, apresentaram coeficiente de Abertura Líquida decrescente entre os anos de 1990 e 2001, já o setor de Papel e Celulose apresentou queda entre os anos de 1994 e 1998, mas no período seguinte recuperou participação.

Os setores de Química e Têxtil apresentaram Coeficiente de Abertura negativa, ou seja, o que exportaram não foi o suficiente para compensar o valor das importações necessárias ao setor.

Comparando os resultados apresentados na Tabela 7 à Figura 10, constata-se que os setores que têm os maiores Coeficientes de Abertura Líquida são justamente os setores onde a Intensidade Energética é maior, e mais, é onde a intensidade mais cresceu nos últimos anos. O mesmo resultado vale para os setores onde os Coeficientes de Abertura Líquida são negativos. Nesses setores, a intensidade energética tende a diminuir ou a permanecer em patamares menores, contudo, nada mais pode ser dito a respeito com relação à causalidade.

Portanto, a utilização da Taxa de Câmbio Real como determinante da intensidade energética visa medir a influência das exportações e importações dos setores industriais na Eficiência Energética.

Para tanto, inicialmente deve-se determinar se os processos geradores das séries são estacionários ou não, para tal, utilizou-se o teste de raiz unitária de Dickey-Fuller Aumentado ou ADF. O procedimento para detectar raiz unitária através do teste ADF foi baseado em Enders (1995).

A Tabela 8a apresenta o teste de Raiz Unitária ADF para as séries de Utilização da Capacidade Instalada, Formação Líquida de Capital Fixo, Taxa Real de Câmbio e Índice do Efeito Intensidade obtido a partir da decomposição da Intensidade Energética.

Tabela 8a – Teste de Raiz Unitária ADF para as séries Capacidade Instalada da Indústria, Formação Líquida de Capital Fixo, Intensidade Energética e Taxa de Câmbio Real

	Constante e Tendência τ_τ		Constante τ_μ		Sem Constante e Tendência τ		Primeira diferença	
	Estatística de Teste*	p-Valor	Estatística de Teste*	p-Valor	Estatística de Teste*	p-Valor	Estatística de Teste*	p-Valor
Cap Inst	-2,05	0,55	-2,02	0,27	-0,11	0,64	-4,90	0,00
FLCF	-1,30	0,87	0,28	0,97	1,45	0,96	-2,75	0,00
Intensidade	-4,06	0,02	-1,25	0,64	1,09	0,92	-6,57	0,00
Câmbio	-2,33	0,40	-1,32	0,60	-0,51	0,48	-5,56	0,00

Fonte: Dados da pesquisa. * Valores críticos: MacKinnon (1996).

Utilizando o procedimento proposto por Enders (1995), constata-se que partindo de uma especificação mais geral, ou seja, com tendência e constante, as Séries Utilização da Capacidade Instalada (Cap Inst), Formação Líquida de Capital Fixo (FLCF) e Taxa Real de Câmbio (Câmbio) não se mostraram estacionárias, porém a série Intensidade Energética se mostrou estacionária ao nível de 5%, mas não se mostrou ao nível de 1%.

Para especificações mais restritas, como ADF com constante e sem constante e tendência, todas as séries analisadas não apresentaram estacionariedade. Contudo, quando foi

realizado o teste ADF em primeira diferença, todas as séries foram estacionárias, ou seja, todas são I(1).

A Tabela 8b apresenta o teste de Raiz Unitária GLS-DF para as séries de Utilização da Capacidade Instalada, Formação Líquida de Capital Fixo, Taxa Real de Câmbio e Índice do Efeito Intensidade obtido a partir da decomposição da Intensidade Energética para que se possa contrastar com os resultados obtidos na Tabela 8a.

Tabela 8b – Teste de Raiz Unitária GLS-DF para as séries Capacidade Instalada da Indústria, Formação Líquida de Capital Fixo, Intensidade Energética e Taxa de Câmbio Real

	Constante e Tendência ¹	Constante ²	Primeira diferença ²
	Estatística de Teste		
Cap-Inst	-1,80	-1,62	-4,88*
Intensidade	-3,81*	-0,72	-6,84*
FLCF	-1,88	1,46	-1,48
Câmbio	-2,21	-1,34	-5,10*

Valores Críticos: ¹*1% = -3,77, **5% = -3,19 e ***10% = -2,89. ²*1% = -2,63, **5% = -1,95 e ***10% = -1,61. Fonte: Dados da pesquisa.

Corroborando os resultados encontrados anteriormente, os resultados do teste GLS-DF indicaram que apenas a série Intensidade rejeita a hipótese de raiz unitária, contudo a um nível de significância de 1% como pode ser visto na Tabela 8b. Com relação às demais séries, todas de acordo com o teste não rejeitaram a hipótese nula de raiz unitária, utilizando constante e tendência. Vale notar que pelo método utilizado (GLS-DF) a série Formação Líquida de Capital Fixo não se mostrou estacionária em primeira diferença, fato este não indicado no teste ADF.

Após os testes de Raiz Unitária é necessário à correta determinação do número de defasagens a serem incluídos na especificação do modelo VAR que será utilizado no procedimento de Johansen (1988) para testar Cointegração. Para determinar o número de defasagens foram adotados os critérios de *Schwarz* (SC) e de *Akaike* (AIC).

A Tabela 9 apresenta os resultados de acordo com cada critério.

Tabela 9 - Estrutura de defasagem do modelo VAR(p)

Lag	AIC	SC
0	-4,195	-4,014
1	-12,184	-11,277
2	-13,086*	-11,454*
3	-12,363	-10,005

Fonte: Dados da Pesquisa.

Como o número de observações é reduzido, procedeu-se o teste de defasagens com um máximo de 3 lags. De acordo com o critério de *Akaike*, o número o ótimo que minimiza tal critério são 2 lags, o mesmo resultado indica o Critério de *Schwarz*.

A partir da correta especificação do modelo VAR, realizou-se o teste proposto por Johansen (1988) e Johansen e Juselius (1990), com o objetivo de encontrar, caso exista, relações de longo prazo entre as variáveis, ou seja, os vetores de Cointegração. Para tanto, utilizou-se o teste do traço.

A Tabela 10 apresenta os resultados do teste do Traço. Como o teste é realizado utilizando as variáveis em primeira diferença (equação 3.40), é preciso diminuir o número de defasagens especificadas pelos critérios anteriores em uma unidade. Como os critérios *Schwarz* e *Akaike* indicaram dois lags, o teste de Cointegração foi realizado com um lag.

Tabela 10 – Teste de Cointegração (Traço) entre as séries: Intensidade Energética, Capacidade Instalada na Indústria, Formação Líquida de Capital Fixo e Taxa de Câmbio, não utilizando tendência e lag

	Autovalor	Traço	Valor Crítico a 5%	Prob.
Nenhum	0,94655	127,23280	63,87610	0,00000
1 Vetor*	0,27869	24,71659	42,91525	0,80370
2 Vetores	0,19819	13,28241	25,87211	0,71590
3 Vetores	0,14668	5,55162	12,51798	0,51920

Fonte: Dados da pesquisa.

De acordo com o teste do Traço, a hipótese nula de que o posto da matriz de Cointegração é nulo, é rejeitada ao nível de 1% como mostrado na Tabela 10, portanto há no mínimo um vetor de Cointegração que estabelece as relações de longo prazo entre as variáveis. Contudo, o teste não rejeita a hipótese nula de que há um ou menos vetores de

Cointegração, portanto, o teste do traço indica que, para o nível de significância estabelecido, há um vetor de Cointegração entre as variáveis analisadas.

O passo seguinte foi determinar o vetor de Cointegração que garante que as variáveis caminham juntas a longo prazo. Esta relação está demonstrada na Tabela 11, que também apresenta o nível de significância dos parâmetros estimados.

Tabela 11 – Determinantes da Intensidade Energética na Indústria

INTENSIDADE	FLCF	CAP-INST	CÂMBIO	TENDÊNCIA
1,0000	-0,5872	1,7100	0,2549	0,0221
Desvio	(0,1822)	(0,3463)	(0,0828)	(0,0036)
t	[3,222]*	[-4,9379]*	[-3,0793]*	[-6,0304]*

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados demonstrados na Tabela 11 podem ser melhor visualizados na equação abaixo.

$$I_t = 1,71 \text{ CAPINST}_t + 0,255 \text{ CAMBIO}_t - 0,587 \text{ FLCF}_t + 0,022 T_t \quad (4.3)$$

(4,93)* (3,08)* (-3,22)* (6,03)*

A Formação Líquida de Capital Fixo (FLCF) é um indicador melhor para captar os novos investimentos na indústria que a Formação Bruta de Capital Fixo, porque esta não leva em consideração a depreciação, ou seja, faz parte do estoque de capital apenas o que foi utilizado para produção, descontando o que foi incorporado apenas para recompor o capital desgastado.

Com relação a este indicador, um aumento de 1% na FLCF implica na redução de 0,587% da Intensidade Energética na indústria, ou seja, novos investimentos para a modernização e ampliação do parque industrial estimulam a redução do gasto energético por unidade de valor produzido. O parâmetro estimado se mostrou significativo ao nível de 1% como mostrado na equação (4.3).

A Figura 12 denota a relação existente entre a Taxa de Investimento e o Efeito Intensidade.

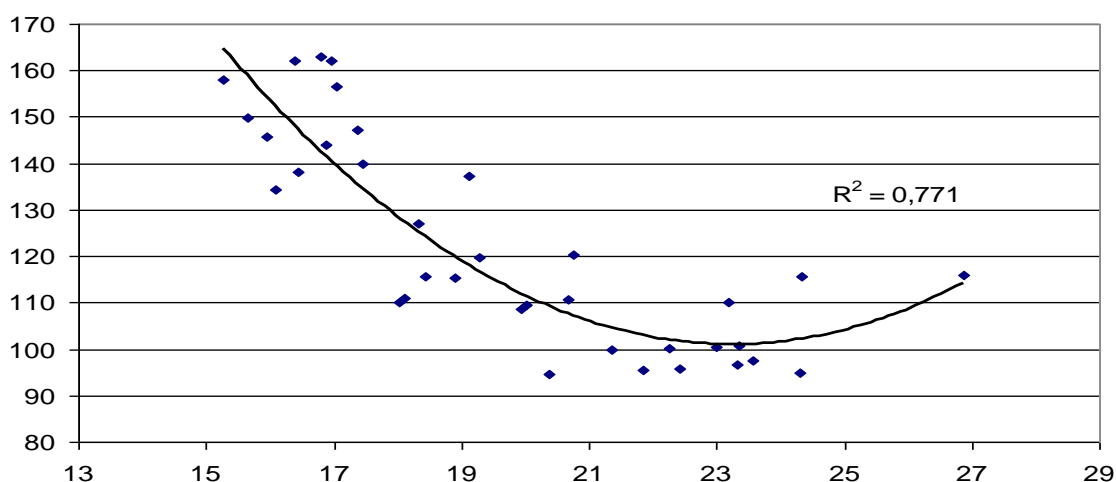


Figura 12 – Relação entre Taxa de Investimento e Índice do Efeito Intensidade

Fonte: IBGE e Dados da pesquisa.

De acordo com a Figura 12, quanto maior a Taxa de Investimento menor tende a ser o Efeito Intensidade, corroborando assim com o resultado obtido através da equação (4.3). As implicações destes resultados são diretas, o aumento verificado no Efeito Intensidade denotado pela Figura 9 advém da baixa taxa de investimento verificado a partir de 1994, por outro lado, o Efeito Intensidade volta a diminuir, na mesma Figura, quando a Taxa de Investimento a economia volta a se recompor.

Por sua vez, a Utilização da Capacidade Instalada (CAPINST) contribui para o aumento da intensidade; 1% de aumento na CAPINST implica uma elevação de 1,71% na Intensidade Energética. O parâmetro estimado se mostrou significativo ao nível de 1%.

Combinando os resultados encontrados para a Formação Líquida de Capital Fixo e da Utilização da Capacidade Instalada, pode-se concluir que o investimento feito pela indústria contribui para o aumento da intensidade se não for o suficiente para manter constante a Utilização da Capacidade Instalada, pois o aumento da Formação Líquida de Capital Fixo naturalmente aumenta a Capacidade Instalada, porém o crescimento da produção industrial a uma taxa superior a taxa de investimento líquida contribui para reduzir a margem de folga das plantas industriais. Em outras palavras, algumas indústrias podem utilizar suas plantas industriais a um nível acima do ponto ótimo de produção.

Com relação à Taxa Real de Câmbio, uma desvalorização de 1% implica um aumento na intensidade energética de 0,255%. O parâmetro estimado se mostrou significativo ao nível de 1%. Como a maior parte dos setores energo-intensivos são exportadores líquidos, como por exemplo, os setores de Metalurgia e Papel e Celulose, uma desvalorização cambial eleva

suas receitas em reais (moeda corrente) o que pode ter contribuído para diminuir os incentivos relativos à Eficiência Energética para estes setores. O oposto também pode ser presumido, já que uma valorização cambial tende a reduzir as receitas e assim pressionar as indústrias a cortar custos, entre eles, gastos com energia.

5 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao se decompor a intensidade energética em dois efeitos distintos, Efeito Intensidade e Efeito Estrutural verificou-se que o aumento da intensidade energética deve-se principalmente ao aumento de participação de setores energo-intensivos na indústria brasileira, ou seja, o Efeito Estrutural responde pela maior contribuição na explicação da Intensidade Energética. Entretanto, o Efeito Estrutural praticamente não se alterou durante todo o período de análise, entre 1970 e 2008, inclusive contribuiu de modo a reduzir a intensidade energética entre os anos de 1992 e 2004, ou seja, mesmo os setores energo-intensivos ganhando participação no consumo de energia no período analisado, o valor bruto da produção gerado nestes setores mais que compensou o aumento de participação destes no consumo de energia.

O Efeito Intensidade foi o grande responsável pela perda de Eficiência no consumo de energia. Portanto, a conclusão relativa à primeira parte do trabalho foi de que a hipótese inicial foi rejeitada, ou seja, o método de decomposição da Intensidade Energética mostrou claramente que o aumento da intensidade energética se deve a perda de eficiência na utilização da energia.

A partir da rejeição da hipótese ganha importância entender a dinâmica do Efeito Intensidade e, para isso, propõe-se identificar os principais determinantes da produção industrial e do consumo de energia. Para tanto, utilizou-se a Formação Líquida de Capital Fixo – Máquinas e Equipamento industrial por representarem o estoque de capital. Também se fez uso da Utilização da Capacidade Instalada na Indústria por ser um indicador de excesso ou de subutilização do parque industrial, já que em geral, as plantas industriais são construídas de acordo com um nível ótimo de produção, qualquer nível acima ou abaixo do ótimo pode interferir na eficiência ou produtividade dos insumos. Outra variável importante utilizada na determinação da intensidade energética foi a Taxa de Câmbio Real, dado que a maior parte dos setores energo-intensivos industriais também se caracterizam pela forte abertura ao comércio exterior.

Os resultados encontrados sugerem que o aumento na Utilização da Capacidade Instalada implica na perda de Eficiência Energética, ou seja, no aumento do Efeito Intensidade por parte da Indústria nacional. Por outro lado, aumento na Formação Líquida de Capital Fixo contribui para a redução do Efeito Intensidade que implica aumento na utilização

eficiente de energia. Todavia, há falta de trabalhos para que os resultados pudessem ser comparados.

Conclui-se que o baixo investimento industrial no Brasil foi um dos principais fatores que determinam a diminuição da Eficiência Energética no setor, a partir de 1994 quando a taxa de investimento alcançou 20,75% do PIB, esta declinou até chegar em 2003 a apenas 15,28% do PIB, o menor valor da série histórica utilizada neste trabalho, que por sua vez, veio se recuperando até alcançar 19,11% do PIB em 2008. Comparando os dados obtidos, fica claro que o Efeito Intensidade passa a reduzir justamente no período de recuperação do investimento.

Por fim, vale destacar que um dos objetivos deste trabalho era estimar os determinantes do consumo de energia pela indústria brasileira. Os resultados encontrados sugerem que um aumento de 1% no Efeito Intensidade tem impacto de 0,297% no consumo de energia industrial. De posse deste resultado e dos acima citados, conclui-se que o aumento da Taxa de Investimento na economia, além de aumentar a Eficiência Energética na indústria, também é responsável por reduzir o consumo de energia e assim beneficiar tanto o próprio setor industrial através da redução de custos quanto toda a sociedade através dos benefícios que a redução da produção de energia pode gerar no meio ambiente e na poupança de recursos não renováveis.

Com relação a políticas públicas, o governo pode incentivar a adoção de procedimento e equipamentos mais modernos e eficientes, além de incentivar a se instalar no país indústrias poupadoras de energia. Em termos financeiros, um aumento de 10% da eficiência no uso da energia poderia economizar aproximadamente R\$ 3,87 bilhões de reais¹⁴ em custos de produção para a indústria brasileira, o que poderia se refletir em toda a cadeia de produção e até contribuir para uma maior competitividade dos produtos brasileiros no comércio exterior.

Fica como proposta para futuros trabalhos aplicar os métodos utilizados para outros países com a finalidade de confrontar os resultados obtidos neste, especialmente, os relacionados às seções 4.2 e 4.3. Outra importante extensão decorre da limitação do escopo utilizado neste trabalho, onde se analisou apenas o setor industrial para o período 1970 a 2008. É possível ampliar os resultados para outros setores da economia. Outra vertente importante para futuros trabalhos é a determinação das influências dos demais efeitos, já que neste priorizou-se o Efeito Intensidade.

¹⁴ Simulação supondo consumo de 85678×10^3 tep de energia no ano de 2010 pela indústria, 1 tep = 6,841 bep e, barril de petróleo a U\$ 120,00 e taxa de câmbio de U\$ 1 = R\$ 1,85.

REFERÊNCIAS

ALVES, S. S. **Tipificação dos instrumentos de políticas de apoio à eficiência energética: a experiência mundial e o cenário nacional.** 2007, 187p. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 3 ed. Brasília,. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>. Acesso em: 15 jul 2010.

ANG, B.W. Decomposition of industrial energy consumption: the energy intensity approach. **Energy Economics**, Singapore, v. 16 n. 3, p.163–174. 1994.

ANG, B. W. Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?. **Energy Policy**, Hastings, v. 32, p. 1131-1139. 2004.

ANG, B.W; CHOI, K.H. Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: a refined Divisia index method. **The Energy Journal**, Cleveland, v.18 n. 3, p. 59–73. 1997.

ANG, B.W; ZHANG, F.Q; CHOI, K.H. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition. **Energy**, Aalborg, v. 23 n. 6, p. 489–495. 1998.

ANG, B. W; ZHANG, F. Q. A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies. **Energy**, Aalborg, v. 25, p. 1149-1176. 2000.

ANG, B.W; LIU, F.L. 2001. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation. **Energy**, Aalborg, v. 26 n. 6, p. 537–548. 2001.

ARSENAULT, E; BERNARD, J-T; CARR, C. W; GENEST-LAPLANTE, E. A total energy demand model of Québec. **Energy Economics**, Singapore, v. 17, n. 2, p. 163-171. 1995.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2008. Disponível em: <http://www.ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 24 ago. 2010.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2009. Disponível em: <http://www.ben.epe.gov.br/>. Acesso em: 24 ago. 2010.

BENNET, T.L.. The theory of measurement of changes in cost of living. **J. Roy. Statistic Society**, London, v. 83, p. 455–462. 1920.

BERNDT, E. R; WOOD, D. O. Technology, prices, and the derived demand for energy. **The Review of Economics and Statistics**. Cambridge, v. 57, n. 3, p. 259-268. 1975.

BINGER, B. R.; ROFFMAN, E. **Microeconomics with Calculus.** 2. ed. Massachusetts: Addison-Wesley, 1998. 633p.

BOYD, G; MCDONALD, J.F; ROSS, M; HANSON, D.A.. Separating the changing composition of US manufacturing production from energy efficiency improvements: a Divisia index approach. **The Energy Journal**, Cleveland, v. 8, p. 77–96. 1987.

BOYD, G.A; HANSON, D.A; STERNER, T. Decomposition of changes in energy intensity: a comparison of the Divisia index and other methods. **Energy Economics**, Singapore, v. 10, p. 309–312. 1988.

CAMPBELL, J. Y., PERRON, P.. Pitfalls and oportunities: what macroeconomists should know about unit roots. In: BLANCHARD, O. J., FISCHER, S. Eds. **NBER Macroeconomics Annual**. Cambridge: The MIT press, 1991. p. 141-201.

CHIANG, A. C. **Matemática para Economistas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1982. 684p.

CHOI, K-H; ANG, B. W. Decomposition of aggregate energy intensity changes in two measures: ratio and difference. **Energy Economics**, Singapore, v. 25, p. 615-624. 2003.

CLARKE, H. R. On the specification of neoclassical energy demand functions. **Resources and Energy**, North-Holland, v. 5, p. 331-347. 1983.

DEBERTIN, D. L. **Agricultural production economics**. New York: MacMillan, 1987. 366p.

ENDERS, W. **Applied econometric time series**. New York: John Wiley and Sons, 1995. 433p.

ENGLE, R. F.; GRANGER, C.W.J. Co-integration and error correction representation, estimation and testing. **Econometrica**, Chicago, n.55, p. 251-276, 1987.

ELLIOT, G.; ROTHENBERG, T.J.; STOCK, J.H. Efficient tests for an autoregressive unit root. **Econometrica**, Chicago, v. 64, n. 4 , p. 813-836, 1996.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2030 – Eficiência Energetica**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx>. 2007a. Acesso em: 20 set. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2030 – Analise Restrospectiva**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx>. 2007b. Acesso em: 20 set. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2030 – Projeções**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx>. 2007c. Acesso em: 20 set. 2010.

FISHER I. **The making of index numbers**. 3rd ed. Boston, MA: Houghton Mifflin, 1972. 550p.

FOX, A.J. Outliers in time series. **Journal of the Royal Statistic Society**, London, n. 34, p. 350-363. 1972.

FRANSES, P.H.; HALDRUP, N. The Effects of additive outliers on tests for unit roots and cointegration. **Journal of Business & Economic Statistics**, Alexandria., v.12 n. 4, p. 471-478, Oct. 1994.

GARCIA, F.; BANDEIRA, S. C.; LUCINDA, C. R. **A contribuição econômica e social da indústria energo-intensiva brasileira**. São Paulo: FGV, 2005. 45 p. (Relatório de Pesquisa).

. GREENING, L. A; DAVIS, W. B; SCHIPPER, L; KHRUSHCH, M. Comparison of six decomposition methods: application to aggregate energy intensity for manufacturing in 10 OECD countries. **Energy Economics**. Singapore, v. 19, p. 375-390. 1997.

GREMAUD, A. P., VASCONCELLOS, M. A. S. de, JÚNIOR, R. T.. **Economia Brasileira Contemporânea**. 7. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2009. 659p.

GRIFFIN, J. M; SCHULMAN, C. T. Price Asymmetry in energy demand models: a proxy for energy-saving technical change?. **The Energy Journal**, Cleveland, v. 26 n. 2, p. 1-21. 2005.

GUJARATI, D.N. **Econometria básica**. 3.ed. São Paulo: Markron Books, 2000. 830p.

HAAS, R., SCHIPPER, L.. Residential energy demand in OECD countries and the role of irreversible efficiency improvements. **Energy Economics**, Singapore, v. 20, p. 421-442. 1998.

HAMILTON, J. D. **Time series analysis**. Princenton: Princenton University Press, 1994. 799p.

HENRIQUES JR, M., SCHAEFFER, R.. Uso de energia na indústria brasileira – Indicadores de intensidade e de eficiência energética. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 7; SEMINÁRIO LATIOAMERICANO DE ENERGIA, 2; 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 1996. p. 2415-2426.

HOWARTH, R. B; SCHIPPER, L; DUERR, P. A; STROM, S. Manufacturing energy use in eight OECD countries: Decomposing the impacts of changes in output, industry structure and energy intensity. **Energy Economics**. Singapore, v. 13 n. 2. 1991. p. 135-142.

HOWARTH, R. B; SCHIPPER, L; ANDERSSON, B. The Structure and intensity of energy use: trend in five OECD nations. **The Energy Journal**, Cleveland, v. 14, n. 2. p. 27-46, 1993.

INTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTÁTISTICA. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/indust/default.asp?z=t&o=21&i=P>. Acesso em: 15 ago. 2010.

JOHANSEN, S. Statistical analysis of cointegration vectors. **Journal of Economic Dynamics and Control**, Amsterdam, n. 12, p. 231-254, 1988.

JOHANSEN, S.; JUSELIUS, K. Maximum likelihood estimation and inference on cointegration: with applications to the demand for money. **Oxford Bulletin of Economics and Statistics**, Oxford, n.52, p. 169 – 219, 1990.

- KEMFERT, C. Estimated substitution elasticities of a nested CES production function approach for Germany. **Energy Economics**, Singapore, v. 20, p. 249-264. 1998.
- KEMFERT, C; WELSCH, H. Energy-Capital-Labor substitution and the economic effects of CO₂ abatement: evidence for Germany. **Journal of Policy Modeling**, New York, v. 22, p. 641-660. 2000.
- KULSHRESHTHA, M; PARIKH, J. K. Modeling demand for coal in India: vector autoregressive models with cointegrated variables. **Energy**, Aalborg, v. 25, p. 149-168. 2000.
- LIU, X.Q; ANG, B.W; ONG, H.L. The application of the Divisia index to the decomposition of changes in industrial energy consumption. **The Energy Journal**, Cleveland, v. 13 n. 2, p. 161-177. 1992.
- LÜTKEPOHL, H.; KRÄTZIG, M. **Applied time series econometrics**. Cambridge: University Press, 2004. 323 p.
- MACHADO, G. V., SCHAEFFER, R.. A inserção do Brasil na nova ordem internacional: uma nova ordem energética mundial?. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 4, n. 1. p. 1-12, 1995.
- MACKINNON, J. G.. Numerical Distribution Functions for Unit Root and Cointegration Test. **Journal of Applied Econometrics**, Chichester, v. 11, p. 601-618. 1996.
- MADDALA, G.S.; KIM, I.M. **Unit roots, cointegration, and structural change**. New York: Cambridge University, 1998. 505p.
- MAS-COLELL, A.; WHINSTON, M. D.; GREEN, J. R. **Microeconomic Theory**. New York, Oxford: Oxford University Press, 1995. 981p.
- MATTOS, L. B., LIMA, J. E.. Demanda residencial de energia elétrica em Minas Gerais: 1970 – 2002. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 15 n. 3, p. 31-52. set./dez. 2005.
- MATTOS, R. S; HADDAD, E. A; PEROBELLI, F. S; FARIA, W. R. Integração de Modelos Econométricos e de insumo-produto para previsões de longo-prazo da demanda de energia no Brasil. **Estudos Econômicos**, São Paulo, v. 38, n. 4, p. 675-699. 2008.
- MCRAE, R. Primary energy demand in Canada. **Energy Economics**. Singapores, v. 1, n. 4. p. 203-210. 1979.
- MOTTA, R. S.; ARÚJO, J. L. Decomposição dos efeitos de intensidade energética no setor industrial brasileiro. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, Rio de Janeiro, v.19 n.1 p. 113-132. Rio de Janeiro, 1989.
- PARK, S. H., DISSMANN, B., NAM, K. Y.. A cross-country decomposition analysis of manufacturing energy consumption. **Energy**. Aalborg, v. 18, n. 8. p. 843-858. 1993.
- PINDYCK, R. S. Interfuel substitution and the industrial demand for energy: na international comparison. **The Review of Economics and Statistics**, Cambridge, v. 61, n.2, p. 169-179. 1979.

PIRES, J. C. L., GOSTKORZEWICZ, J., GIAMBIAGI, F. **O cenário macroeconômico e as condições de oferta de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: IPEA, 2001. 35 p. (Textos para Discussão, 85).

PIRES, J. C. L., GOSTKORZEWICZ, J., GIAMBIAGI, F.. **As perspectivas do setor elétrico após o racionamento**. Rio de Janeiro: IPEA, 2002. 26 p. (Texto para Discussão, 97).

POLEMIS, M. L. Modeling industrial energy demand in Greece using cointegration techniques. **Energy Policy**, Hastings, v. 35, p. 4039-4050. 2007.

RAPOSO, L.R. **Análise da relação volatilidade de preço-volume nos mercados brasileiros de futuros agropecuários**. 2000. 126f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.

RIBEIRO, F.; POURCHET, H. Coeficientes de Orientação Externa da Indústria Brasileira: Novas Estimativas. **Revista Brasileira de Comércio Exterior**. Rio de Janeiro, v. 1 n. 74. p. 14-27. 2002.

SCHMIDT, C. A. J., LIMA, M. A. M.. A demanda por energia elétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 58 n. 1, p. 67-98. jan./mar. 2004.

SPIEGEL, M.R.. **Theory and Problems of Advanced Calculus**. Michigan: McGraw-Hill. 1963. p. 384.

SUN, J. W. Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model. **Energy Economics**, Singapore, v. 20, p. 85-100. 1998.

TSAY, R.S. Outliers, level shifts, and variance changes in time series. **Journal of Forecasting**, London, n.7, p. 1-20, 1988.

VARIAN, H. R. **Microeconomia: princípios básicos**. Rio de Janeiro: 4. Ed., Campus, 1999. 740p.

WORRELL, E., PRICE, L., MARTIN, N., FARLA, J., SCHAEFFER, R.. Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators. **Energy Policy**, Hasting, v. 25, n. 7-9, p. 727-744. 1997.

YI, F. Dynamic energy-demand models: a comparison. **Energy Economics**, Singapore, v. 22, p. 285-297. 2000.