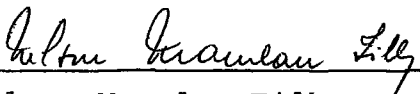



SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS ALTERNATIVOS PARA A  
EVOLUÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO BRASILEIRO

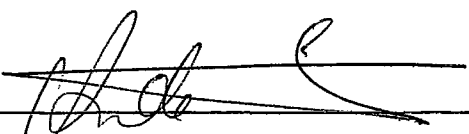
Emilio Lèbre La Rovere


TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Nelson Maculan Filho  
(Presidente)

  
\_\_\_\_\_  
Affonso Carlos Seabra da Silva Telles

  
\_\_\_\_\_  
Andrea Levy

  
\_\_\_\_\_  
Ronaldo Cesar Marinho Persiano

RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL

JUNHO DE 1977

LA ROVERE, EMILIO LEBRE

Simulação de Cenários Alternativos para a Evolução do  
Setor Energético Brasileiro Rio de Janeiro 1977.

IX, 108 p. 29,7cm (COPPE-UFRJ, M.Sc., Engenharia de  
Sistemas e Computação, 1977)

Tese - Univ. Fed. Rio de Janeiro . Fac. Engenharia

I. Planejamento Energético I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

"On s'imagine que l'équité et la consommation d'énergie pourraient croître ensemble. Victimes de cette illusion, les hommes industrialisés ne posent pas la moindre limite à la croissance de la consommation d'énergie, et cette croissance se continue à seule fin de pourvoir toujours plus de gens des produits d'une industrie contrôlée par toujours moins de gens.

Si l'on ne détruit pas l'illusion que plus d'énergie, c'est mieux, on ne pourra résoudre la crise de l'énergie".

(Ivan Illich : Énergie et Équité)

A meus pais

Regina e Ruggiero La Rovere

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Andrea Levy que como orientador deu-me as bases fundamentais da sua intuição e como amigo ajudou e cooperou desde as fases iniciais até o fim deste trabalho.

Ao Prof. Nelson Maculan Filho por seu incentivo e valiosas sugestões, e pelo encorajamento de seu exemplo, quanto ao posicionamento crítico do pesquisador na aplicação de seus conhecimentos à realidade brasileira.

Aos meus companheiros do Grupo de Energia da FINEP, por muitas conversas estimulantes e úteis.

Ao Dr. Affonso Telles e ao Dr. Paulo Roberto Krahe pelas demonstrações de apoio e interesse e pela compreensão que criou condições necessárias ao desenvolvimento deste estudo.

A Ana Maria Accurso pela grande eficiência de seu trabalho de datilografia, fator fundamental para a apresentação desta pesquisa no prazo desejado.

RESUMO

A formulação e o estudo de cenários para o fechamento do balanço energético nacional fornecem subsídios para a avaliação das alternativas de introdução das formas não convencionais de energia no setor energético brasileiro.

Um modelo matemático de simulação foi utilizado para representar o setor energético, permitindo equacionar os fluxos e perdas da energia, desde suas fontes primárias até os mercados de consumo.

A análise das simulações induziu uma discussão preliminar sobre a elaboração de critérios globais de planejamento para o setor energético, sendo recomendada a realização de alguns estudos específicos nesse sentido.

ABSTRACT

Alternative scenarios for the evolution of the brazilian energy sector are formulated in order to make an assessment of the introduction of non-conventional energy sources in the system.

A mathematical model was built to represent the national energy sector, accounting for energy fluxes and losses from the primary sources till the consumer markets.

The analysis of the simulated alternatives led to a preliminary discussion about energy planning criteria. Some new studies on the field are suggested.

RESUMÉ

La définition et l'étude de scénarios du bilan énergétique brésilien fournissent les subsides à la comparaison des alternatives permettant l'introduction de chaînes non-conventionnelles d'énergie dans le secteur.

Un modèle mathématique a été utilisé pour représenter le secteur énergétique, basé sur l'équationnement des flux et pertes depuis les sources primaires jusqu'aux marchés de consommation de l'énergie.

L'analyse des simulations a induit une discussion préliminaire sur l'élaboration de critères globaux pour la planification du secteur énergétique, recommandant la réalisation d'études spécifiques dans ce sens.



ÍNDICE

CAPÍTULO I	- INTRODUÇÃO	
I.1	- O Problema de Planejamento Energético .....	1
I.2	- Histórico .....	2
I.3	- Plano da Exposição .....	4
CAPÍTULO II	- DEFINIÇÃO DO MODELO	
II.1	- Características do Setor Energético .....	5
II.2	- Modelagem e Planejamento Energético .....	9
II.3	- Dados sobre o Caso Brasileiro .....	12
II.4	- Caracterização do Modelo Adotado .....	14
CAPÍTULO III	- DESCRIÇÃO DO MODELO	
III.1	- Representação do Setor Energético .....	17
III.2	- Equacionamento .....	23
CAPÍTULO IV	- APRESENTAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS	
IV.1	- Cenário-base .....	26
IV.2	- Cenários Alternativos .....	30
IV.2.1	- Hipóteses e Resultados .....	30
IV.2.2	- Análise de Investimentos .....	40
CAPÍTULO V	- DISCUSSÃO DOS CENÁRIOS	
V.1	- Cenário-base	
V.1.1	- Discussão das Hipóteses .....	49
V.1.2	- Discussão dos Resultados .....	51
V.2	- Cenários Alternativos	
V.2.1	- Discussão das Hipóteses .....	56
V.2.2	- Discussão dos Resultados .....	57
CAPÍTULO VI	- CONCLUSÕES	
VI.1	- Validade .....	62
VI.2	- Limitações .....	64
VI.3	- Subsídios para formulação de uma política e nergética - Perspectivas .....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	69
Apêndice 1	- A Conservação do Fluxo de Energia no Modelo ...	72

Apêndice 2 - Utilização das Equações do Modelo na Simulação de Cenários .....	75
Apêndice 3 - Compatibilização dos Dados e Apresentação do Cenário-base para 1985 .....	82
Apêndice 4 - Implementação do Modelo em Computador .....	90
Apêndice 5 - Listagem de Hipóteses e Resultados da Introdução de Formas Não Convencionais no Setor Energético Brasileiro .....	92

## CAPITULO I

### INTRODUÇÃO

#### I.1 - O Problema de Planejamento Energético

A atividade de planejamento se caracteriza pela avaliação de linhas de ação alternativas, com vistas à tomada de decisões adequadas à consecução do objetivo definido pelo sujeito do planejamento. O problema com que se defronta o planejador energético é a escolha de uma alternativa, dentre um conjunto de possibilidades, para o atendimento de um dado quadro de necessidades de consumo de energia. São-lhe fornecidos como conhecidos "a priori", e portanto fogem à sua esfera de decisão, os critérios limitantes do conjunto de consumidores que devem ter suas necessidades energéticas atendidas, do conjunto de alternativas consideradas viáveis e também os critérios que fixam a valoração a ser atribuída a cada alternativa, isto é, os objetivos que devem ser perseguidos no processo de seleção da alternativa a ser adotada. Assim, cabe-lhe apenas o papel de: caracterizar mais detalhadamente cada alternativa de política energética a ser considerada viável, e o quadro de necessidades energéticas a serem atendidas, através da quantificação das variáveis envolvidas; e aplicar um método de resolução capaz de selecionar, como resultado de hipóteses introduzidas "a priori", a alternativa mais adequada, segundo os critérios de mérito previamente definidos.

A ideologia do sujeito da atividade de planejamento determina quais os objetivos que devem ser perseguidos e influencia a escolha dos meios para alcançá-los (ver Godelier<sup>1</sup>). Daí a importância assumida pelo contexto em que o planejador está inserido, como condicionante primeiro da forma de ataque ao problema objeto de estudo. Na realização deste trabalho, a intenção do autor foi atender a uma necessidade definida do grupo de estudos sobre energia da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP. Encontra-se a seguir uma apresentação da forma de atuação desse grupo diante da realidade nacional do setor de energia, e das condições a que devia atender a concepção deste estudo.

## I.2 - Histórico

A política energética do governo brasileiro vem sendo orientada no sentido de procurar diminuir a dependência externa no setor, seja pelo aumento da produção de petróleo, seja pela poupança de energia, seja ainda incrementando a oferta de fontes alternativas internas. É nestas duas últimas direções que a FINEP, Órgão da Secretaria de Planejamento da Presidência da República para fomento ao desenvolvimento tecnológico, vem atuando desde 1974, através da implantação de programas de estudos e pesquisas sobre conservação de energia e sobre formas energéticas alternativas, ditas não convencionais, passíveis de utilização a curto, médio ou longo prazo.

Cada programa consiste em um conjunto de projetos de pesquisa e desenvolvimento de protótipos e em estudos da viabilidade técnico-econômica das alternativas tecnológicas consideradas, a cargo de grupos de pesquisadores em universidades, institutos de pesquisa e empresas, recebendo apoio financeiro e técnico da FINEP.

Assim, no decorrer dos últimos tres anos, foram acumulados pelo grupo de energia da FINEP conhecimentos sobre aplicações específicas do aproveitamento da energia solar, da utilização do carvão nacional, do uso de hidrogênio eletrolítico e do aproveitamento de matéria de origem orgânica - biomassa, entre outras (ver FINEP<sup>2</sup>). Por oposição, o grupo se ressentia da falta de uma visão global do setor energético brasileiro, que permitisse definir a importância relativa e o alcance das diversas formas energéticas não convencionais e medidas de conservação de energia, no atendimento ao quadro nacional de necessidades de consumo energético. Essas noções são fundamentais para o estudo pelo grupo da passagem, em cada caso, do nível de protótipo à produção em larga escala. Para medir o alcance e a importância relativa de cada alternativa tecnológica considerada, é preciso avaliar seus benefícios e custos, definidos a partir dos critérios de mérito estabelecidos "a priori".

Assim, o objetivo deste trabalho foi o de fornecer um instrumento quantitativo que ajudasse a suprir essa necessidade, a

través da elaboração de um modelo matemático para representar, de forma esquemática e simplificada, a configuração geral do setor energético e a introdução de formas alternativas de energia no setor. Dada a complexidade da realidade do setor energético, o escopo do estudo foi limitado de modo a permitir que esse instrumento entrasse rapidamente em funcionamento, para avaliar, com base nos resultados preliminares obtidos, as perspectivas de ampliação do âmbito do trabalho. Nessa primeira etapa do estudo, quanto aos critérios fornecidos "a priori" ao planejador, mencionados na seção anterior (I.1), as condições impostas foram:

- a) caracterização das necessidades energéticas a serem atendidas através do quadro de consumo energético nacional considerado pelo planejamento governamental
- b) determinação da viabilidade de cada alternativa de atendimento às necessidades energéticas, através de fatores técnicos e da limitação do total de investimentos envolvidos.
- c) avaliação do mérito das alternativas consideradas viáveis, pelo nível de auto-suficiência energética e dos investimentos correspondentes.

Uma vez caracterizado o contexto que deu origem à realização deste trabalho, apresenta-se a seguir o plano de exposição adotado na redação do texto.

### I.3 - Plano da Exposição.

O Capítulo II apresenta o estudo desenvolvido para a escolha do modelo matemático que veio a ser adotado. A partir da análise do estado da arte de modelagem dos sistemas energéticos, e dos dados sobre o caso brasileiro, chega-se à caracterização dos requisitos a serem atendidos pelo modelo matemático, para que seja adequado ao tipo de utilização desejada, ao sistema em estudo e aos dados existentes.

No Capítulo III, vem as hipóteses e equações que constituem o modelo de simulação de cenários alternativos - M.S.C.A. É fornecido um exemplo, ilustrando a representação adotada para o setor energético no M.S.C.A.

O Capítulo IV mostra as experiências realizadas, que consistem na formulação de cenários, de dois tipos, para o fechamento do balanço energético nacional: um cenário-base e diversas alternativas de introdução de formas não convencionais no setor energético brasileiro. Em cada caso apresenta-se a metodologia adotada na realização do teste, as hipóteses assumidas e os resultados obtidos.

No Capítulo V, discute-se então as hipóteses e os resultados de cada teste, surgindo a partir dessa análise as críticas e conclusões do trabalho, bem como as sugestões para o seu prosseguimento.

Finalmente, o Capítulo VI avalia a validade e as limitações do estudo, e apresenta um resumo das suas principais conclusões e das linhas de atuação abertas para o seu prosseguimento.

Com o objetivo de facilitar a leitura do texto principal, a manipulação de equações matemáticas e listagens extensas de hipóteses e resultados são apresentadas em cinco apêndices, reunidos ao final do trabalho.

## CAPITULO II

### DEFINIÇÃO DO MODELO

#### II.1 - Características do Setor Energético

Define-se energia através do conceito físico de trabalho: energia é a capacidade de realizar trabalho. Na natureza, o sol, o calor da Terra, o átomo e a força muscular são alguns exemplos de fontes de energia. Essas fontes primárias se transformam em outras formas de energia, de acordo com a diversidade dos fenômenos físicos de realização de trabalho. Para cada fonte, existe uma cadeia de captação, transporte, armazenamento, transformação em formas intermediárias, distribuição e finalmente consumo, na forma adequada para uso do Homem, da energia, envolvendo perdas ao longo de todo o processo.

A homogeneidade matéria-energia permite conceber toda atividade econômica do Homem como esse tipo de processo, de apropriação e transformação das formas de energia encontradas na natureza, para sua utilização. Segundo essa visão global, o "setor energético" abrangeria toda a economia. É importante esclarecer portanto que a noção de setor energético, no sentido comumente usado, pressupõe uma distinção entre usos "energéticos" e "não energéticos" das formas de energia pelo Homem, nem sempre claramente estabelecida. Neste trabalho será usada a conceituação de uso energético como o consumo de energia elétrica e das diversas formas de energia mecânica e de energia térmica, segundo os critérios do Comitê Nacional Brasileiro (ver CNB<sup>3</sup>) e do Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energia (ver MME<sup>4</sup>), sendo o uso das formas de energia como matéria-prima considerado não energético. Esta escolha decorreu da limitação imposta, nessa primeira etapa, ao escopo do estudo, que não deveria abranger toda atividade econômica da sociedade. Portanto, não se julgou necessário adotar uma metodologia tão geral como, por exemplo, a proposta por Barrera<sup>5</sup>, que usa o conceito termodinâmico de energia como denominador comum para medir quantidades de bens e mercadorias, trabalho humano, efeitos sobre o meio ambiente etc.

Ainda assim, na sua concepção mais restrita, o setor energético é de importância vital para sociedades em processo de industrialização, cada vez mais dependentes da disponibilidade de energia, e seu planejamento global torna-se extremamente complexo, devido aos seguintes fatores, entre outros:

a) Grande intercambiabilidade entre diversas formas de energia. De um modo geral, uma dada necessidade de uso final pode ser atendida por mais de uma forma energética; por exemplo, o aquecimento de água no setor doméstico pode ser realizado por meio de eletricidade, de energia solar e de gás obtido a partir da nafta (derivado de petróleo) ou de carvão mineral. Este fato acarreta um grande número de direções em que é necessário um esforço de pesquisa e desenvolvimento.

b) Inércia a alterações bruscas.

Em oposição ao primeiro fator está a inércia do setor em relação a alterações bruscas, no contexto das economias de mercado. Isto se deve aos enormes investimentos envolvidos nas transformações sofridas pela energia em cada estágio da cadeia que vai da captação à utilização final.

c) Esgotamento dos recursos não renováveis.

A distinção entre recursos energéticos renováveis e não renováveis baseia-se na relação entre o ritmo do consumo pelo Homem desses recursos e a velocidade com que as fontes energéticas primárias da natureza os reproduzem, pela sua transformação. Assim, os combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão), cujo processo de formação é da ordem de milhões de anos, são recursos tipicamente não renováveis, enquanto as energias solar, eólica, maremotriz, hidroelétrica são formas renováveis. Observe-se que, no caso da lenha, as duas classificações podem se verificar, dependendo do ritmo de exploração respeitar ou não o período necessário para o reflorestamento.

Alguns autores (Pestel e Mesarovic<sup>6</sup>, Dumont<sup>7</sup>, entre outros) estimam que, persistindo as taxas atuais e a forma exponencial de crescimento do consumo de energia, as reservas mundiais de petróleo deverão estar esgotadas no prazo de 25 a 50 anos. Este fato é particularmente grave diante da constata-



ção que:

- i) o baixo preço do petróleo, até a criação da OPEP, favoreceu uma "monocultura tecnológica", levando a sociedade mundial a uma situação de extrema dependência desse combustível para o atendimento das suas necessidades de energia térmica e mecânica.
- ii) a transição para o uso de outras formas de energia, ao nível necessário para a substituição do consumo de petróleo, deverá requerer um período da ordem de 20 a 30 anos (segundo Manne<sup>8</sup>), devido à inércia do setor energético, citada anteriormente.

Deve-se ressaltar, porém, que existe grande controvérsia a respeito da possibilidade de esgotamento dos recursos não renováveis. Por exemplo, o grupo da Fundación Bariloche<sup>9</sup> conclui que as reservas mundiais de petróleo devem durar cerca de 100 anos, lembrando que a quantidade utilizável dos recursos não renováveis depende essencialmente de quanto a sociedade está disposta a pagar na sua exploração.

d) Impacto sobre o meio ambiente.

Em todas as etapas da cadeia que vai da captação à utilização da energia, ocorrem processos que podem contribuir para a degradação do meio ambiente (ver Energia e Meio Ambiente<sup>10</sup>). Esse problema vem criando obstáculos cada vez maiores para, por exemplo, a instalação de usinas nucleares, a extração de carvão, a construção de hidroelétricas, de refinarias de petróleo e para o uso de automóveis, em consequência da produção de resíduos radioativos, inundação de terras, emissão de monóxido de carbono na atmosfera, etc. Existe assim uma tensão entre os objetivos de atendimento das necessidades energéticas e de controle da poluição, preservação da natureza e manutenção do equilíbrio ecológico.

A complexidade do setor energético, ilustrada pelos quatro fatores descritos acima, vem propiciando a aplicação da teoria de modelagem de sistemas no equacionamento das variáveis envolvidas no seu planejamento e o uso do computador para processar o grande volume de dados referentes ao setor. Na seção se-

guinte analisa-se o estado da arte de modelagem de sistemas energéticos, com o objetivo de situar a escolha das características do modelo matemático elaborado para representar o caso brasileiro.

## II.2 - Modelagem e Planejamento Energético

Um modelo vem a ser uma imagem ou representação, voluntariamente incompleta e simplificada, de um processo, organismo, fenômeno, sociedade, enfim, do objeto de estudo, a que se dá o nome de sistema. Todo sistema tem componentes com certas características ou atributos, constantes ou variáveis, vinculados por relações ou conexões.

Convém distinguir dois níveis de modelo: mental e explícito. Os modelos explícitos podem ser divididos em tres classes: verbais, físicos e matemáticos. Os modelos matemáticos são os que usam a Matemática como linguagem de formalização.

A conceituação apresentada nos dois parágrafos acima, enunciada por Varsavsky<sup>11</sup>, entre outros, mostra que o uso de modelos matemáticos é simplesmente uma das formas de exprimir o conhecimento adquirido sobre o objeto de estudo. Trata-se de explicitar o modelo mental que se tem de um sistema, através de sua descrição e de uma teoria sobre seu funcionamento (relações causais, sempre hipotéticas, entre seus componentes), usando uma linguagem especialmente criada para facilitar o raciocínio lógico-dedutivo.

Os esforços de construção de modelos matemáticos do sistema energético vem sendo empreendidos por diferentes caminhos, usando quatro principais técnicas de modelagem: otimização, simulação usando parâmetros ajustados econometricamente ou por análise paramétrica e análise "input-output" do quadro geral da economia; (ver Energy Modelling<sup>13</sup>).

### a) Modelos de otimização

Uma forma tradicional desse tipo de modelagem do sistema energético é o modelo de programação linear com a função objetiva de minimizar o custo do atendimento, por fontes conhecidas, das demandas de energia estabelecidas. O trabalho desenvolvido por Cherniavsky<sup>12</sup> é um exemplo dos modelos desse tipo, que são úteis para a obtenção de configurações estáticas como metas a serem perseguidas. Não traçam, porém, o caminho

a ser seguido na transição dos níveis correntes da produção de cada fonte aos níveis projetados na configuração ótima. De um modo geral, a crítica que se faz a esses modelos de otimização é o nível de complexidade resultante, causando a descrença do planejador a respeito das respostas deduzidas pelo modelo, pois os resultados ótimos são dominados por pequenas hipóteses sobre os inúmeros coeficientes embutidos numa pesada estrutura.

#### b) Modelos de Simulação

Os modelos de simulação não usam funções objetivas a serem maximizadas ou minimizadas, mas visam descrever o efeito ao longo do tempo de uma determinada política de atendimento às necessidades energéticas. Outras políticas podem então ser testadas, para análise dos resultados obtidos em comparação ao caso base.

b.1) No caso de modelos que usam parâmetros ajustados economicamente, são feitas previsões dos valores a serem assumidos pelas variáveis do sistema nos anos futuros, através de métodos típicos da Econometria. Assim, os modelos herdam os problemas inerentes a esses métodos: as previsões não incluem a possibilidade de saltos tecnológicos e mudanças estruturais em geral, no sistema. Outra restrição a esses modelos é o grande período de tempo gasto na sua construção, e o exame de grande quantidade de dados da evolução histórica do sistema, para testar a aderência do modelo ao passado.

b.2) Já no caso dos modelos de simulação paramétrica, como o de Baughman<sup>14</sup>, não se trata de prever o futuro desenvolvimento do sistema, mas de apresentar cenários correspondentes a hipóteses introduzidas pelo planejador, através da quantificação dos valores desejados para os parâmetros. O maior defeito desses modelos é que não se baseiam em informações firmes. Suas vantagens são a simplicidade e rapidez, a possibilidade de testar um grande número de alternativas de política ou de valores para os parâmetros, e a interação do planejador com o modelo, através da escolha dos valores de entrada desejados e da percepção do impacto de sua varia

ção nos resultados.

c) Modelos de análise "Input-output" do quadro geral da economia

Esses modelos visam descrever os efeitos de mudanças do setor energético na economia como um todo e vice-versa, através da análise "input-output" de Leontief<sup>15</sup> e da representação microeconômica da economia como um todo. De um modo geral, requerem grande número de dados e frequentemente tornam-se de natureza histórica, e não extrapolativa.

A aplicação desses diversos tipos de modelos depende primeiramente da existência de informações, sobre o setor energético como um todo, disponíveis para o planejador. Em diversos países estrangeiros, os dados necessários ao conhecimento detalhado da estrutura do setor são fornecidos pelo levantamento anual do balanço energético nacional (ver, por exemplo, a publicação argentina da Secretaria de Estado de Energia<sup>16</sup>). Na próxima seção apresenta-se o exame da situação brasileira na área.

### II.3 - Dados sobre o caso brasileiro

No caso brasileiro, o mais importante estudo de modelagem do setor energético foi realizado por um consórcio de firmas consultoras brasileiras, sob a coordenação do MME e do IPEA, no trabalho designado genericamente de Matriz Energética Brasileira - MEB<sup>17</sup>. Seu objetivo geral foi o estudo integrado das diversas formas de energia, em âmbito nacional, desde a captação até o consumo final, para fornecer um instrumento de planejamento do setor energético como um todo.

As principais realizações deste projeto, que não chegou a executar a etapa de montagem e operação dos modelos finais desenvolvidos, foram:

- a) o desenvolvimento de uma metodologia para a execução de estudos energéticos integrados, definindo horizontes de planejamento, níveis de desagregação dos setores de oferta e demanda de energia etc., não obstante as dificuldades existentes, como a estanqueidade da política de planejamento entre alguns setores da oferta de energia (eletricidade, petróleo, carvão, gás, energia nuclear, etc.), a deficiência da rede estatística nacional e a resistência à substituição entre formas energéticas.
- b) o mais detalhado, até o momento, levantamento de informações a respeito da estrutura do balanço energético nacional, fornecendo para o ano de 1970 os dados de fluxo da energia, desde suas formas primárias até os mercados de consumo, quantificando a produção, importação, auto-consumo, consumo do setor energético, perdas, variações de estoque, destinação para uso energético e não energético, em cada transformação ao longo da cadeia.

Após 1970, os dados disponíveis sobre o setor energético como um todo se referem apenas ao consumo de energia primária, nas suas diversas formas, apresentados pelo MME<sup>4</sup>, incluindo o consumo verificado anualmente até 1975 e projeções estimativas para o consumo anual até 1985, discriminando a parcela das impor

tações e da produção nacional no total. Essas projeções já incluem previsões sobre a participação de algumas formas alternativas de energia, como o álcool de cana, o xisto e a energia nuclear, que já tiveram decididas a sua implantação.

## II.4 - Caracterização do Modelo Adotado

Quanto à elaboração do modelo, dois níveis distintos devem ser considerados: a concepção teórica do setor energético, originada pelo modelo mental que o planejador faz da realidade, e a explicitação matemática dessa concepção, através do equacionamento de relações entre as variáveis envolvidas. A exigência de dados que permitam atribuir valores às variáveis do modelo gera um movimento de vaivém entre os dois níveis: a inexistência de informações necessárias à explicitação matemática de uma concepção teórica inicial obriga a sua reformulação, assim como a obtenção de dados adicionais pode também causar sua modificação. A adaptação dessa concepção teórica inicial aos dados disponíveis reinicia o processo, que se repete até convergir para um ponto de compromisso aceitável entre os dois níveis.

Analogamente se dá a interação entre a elaboração e o uso do modelo: o exercício de sua utilização para os fins que se propunha gera resultados que podem induzir o planejador a modificar o modelo inicial, quando por exemplo sentir necessidade de introduzir novas variáveis, não previstas inicialmente. Esta interação leva a um processo de gradativa sofisticação do modelo matemático, acompanhando a evolução do modelo mental do planejador.

Assim, os condicionantes da ação do planejador influem decisivamente sobre a forma assumida pelo modelo matemático usado. No caso deste trabalho, foi adotado um modelo de simulação paramétrica. As razões dessa escolha e as características do modelo resultante devem então ser analisadas à luz do que foi exposto sobre o contexto em que estava inserido o autor, o que será feito a seguir.

O objetivo de ajudar o planejador a obter uma visão global do setor energético brasileiro indicava a conveniência de um modelo didático, que permitisse uma clara compreensão de seu equacionamento, suas hipóteses e resultados. Assim, optou-se por um modelo simples, a princípio, mas versátil, permitindo sua gradativa sofisticação à medida que essa necessidade fosse sen-



tida pelo planejador. Por outro lado, os dados referentes ao fluxo de energia, através de todo o setor, são conhecidos apenas para o ano de 1970 (ver MEB<sup>17</sup>). Para os anos seguintes, até 1985, o Balanço Energético Nacional (MME<sup>4</sup>) fornece somente as estimativas do consumo das formas de energia primária. Fugiria ao escopo do trabalho, proceder ao levantamento de informações mais detalhadas sobre o setor energético como um todo, junto às entidades responsáveis por cada forma de energia, devido à sua grande quantidade e à complexidade da tarefa.

Nessas condições, a ausência de séries históricas completas para os dados de fluxos energéticos não recomendava a adoção de um modelo de simulação usando métodos econométricos para estimação de parâmetros. Modelos de otimização da configuração do setor energético também não eram adequados, devido às características da atuação do grupo da FINEP, que não está vinculado à operação direta dos diversos processamentos da energia envolvidos ao nível do planejamento global do setor, mas é responsável apenas pelo fomento a atividades de pesquisa e desenvolvimento de novas alternativas tecnológicas na área de energia. Além disso, a obtenção de soluções ótimas fugiria ao escopo do trabalho, nessa primeira etapa, pois exigiria a elaboração de estimativas a respeito dos investimentos necessários em cada transformação energética, da captação até o mercado, devido ao fato de não estarem disponíveis dados desse tipo para todo o setor energético. Analogamente, os modelos de análise "input-output" do quadro geral da economia apresentavam o inconveniente da necessidade de estimar e compatibilizar dados, não só sobre o setor energético, mas também para o resto da economia.

Assim, foi escolhido um modelo de simulação usando análise paramétrica, que não visa nem propor soluções ótimas, nem fazer previsões sobre o futuro desenvolvimento do setor, mas testar as hipóteses oriundas das preocupações do planejador. Este interage com o modelo, fornecendo os valores numéricos dos parâmetros que caracterizam uma alternativa viável de atendimento ao quadro de necessidades de consumo energético, em dado ano ou em um período qualquer; e obtendo como resultado um ce-

nário, ou seja, uma configuração do fluxo de energia no setor, desde as formas de energia primária até os diferentes mercados de consumo.

A representação do setor energético pelo modelo baseia-se na divisão em estágios da cadeia que vai da captação até a utilização final da energia. As equações que relacionam os fluxos e as perdas entre as diversas formas de energia, pertencentes a dois estágios consecutivos, são lineares. Os testes realizados com o modelo, na sua versão atual, usam um nível de desagregação compatível com os dados da MEB, projeções e horizonte de planejamento fornecidos pelo MME e dados técnicos e de investimentos, sobre formas alternativas de energia, estimados pela FINEP e por outros órgãos que realizam estudos na área.

É importante ressaltar que, nessa atual versão, o modelo constitui apenas um primeiro passo no sentido da obtenção de um instrumento quantitativo de apoio ao planejador energético. Ele deverá ser ampliado para incluir o processamento de outros dados, que permitam a utilização de outros critérios de mérito no julgamento dos diversos cenários testados, outros quadros de necessidades de consumo energético e outros critérios de viabilidade das alternativas de política. Mais adiante, na discussão dos resultados, essa crítica será retomada. Antes, porém, é importante apresentar de forma detalhada o modelo, o que é feito no capítulo seguinte.

## CAPITULO III

### DESCRIÇÃO DO MODELO

#### III.1 - Representação do Setor Energético

O setor energético é representado no modelo por um conjunto ordenado de vetores. Cada vetor corresponde a um estágio da cadeia de captação, transformação e consumo final da energia. O número de vetores ou estágios e a quantidade de elementos que constituem os estágios refletem o grau de desagregação desejado na representação do setor.

A Figura 1 mostra a visualização da representação adotada para o setor energético no Exemplo 1. Trata-se de um caso simplificado, com pequeno número de estágios e de elementos em cada estágio, montado com o objetivo de ilustrar os conceitos expostos. Nesse exemplo, tem-se 5 formas de energia primária, 7 formas de energia secundária e 6 setores de mercado, representando o setor energético brasileiro, usando dados referentes ao ano de 1970 (ver MEB<sup>17</sup>).

O modelo associa a quantidade produzida de uma dada forma energética à variável  $x(i,j)$ ,  $i$  indicando o estágio e  $j$  diferenciando a forma de energia considerada das demais pertencentes ao estágio  $i$ . No caso do estágio correspondente a setores de mercado,  $x(i,j)$  denota a quantidade de energia consumida em cada setor. É necessário definir um equivalente energético (joule, milhares de toneladas de óleo cru, trilhões de calorías etc) permitindo exprimir essas quantidades na mesma unidade, através do cálculo do fator de conversão correspondente a cada forma de energia. O modelo representa a variação no estoque de uma dada forma de energia através da variável  $s(i,j)$ , para cada elemento  $j$  do estágio  $i$ . Os valores de  $s(i,j)$ , também medidos em equivalente energético, são positivos quando ocorre aumento de estoque, e negativos em caso contrário. Os somatórios, ao longo do mesmo estágio, dos valores das variáveis  $x(i,j)$  e  $s(i,j)$ , são de notados por  $X(i)$  e  $S(i)$ , respectivamente.

FIGURA 1

EXEMPLO 1: Setor Energético Brasileiro  
 Ano de 1970  
 Valores em 1000 Gcal =  $10^{12}$  cal

ENERGIA PRIMARIA	ENERGIA SECUNDARIA	SETORES DE MERCADO
1) Petróleo Importado $x(1,1) = 196497$ $x(1,1) = -$	1) Derivados de Petróleo $x(2,1) = 241595$ $x(2,1) = 1486$	1) Doméstico $x(3,1) = 198459$
2) Produção de Petróleo $x(1,2) = 86216$ $x(1,2) = -2076$	2) Eletricidade $x(2,2) = 166846$ $x(2,2) = -$	2) Industrial $x(3,2) = 218412$
3) Energia Hídrica $x(1,3) = 145237$ $s(1,3) = -$	3) Lenha $x(2,3) = 200437$ $s(2,3) = -$	3) Transportes $x(3,3) = 140072$
4) Lenha $x(1,4) = 228220$ $s(1,4) = -$	4) Carvão Vegetal $x(2,4) = 16040$ $x(2,4) = -$	4) Exportações $x(3,4) = 14000$
5) Outros $x(1,5) = 103366$ $s(1,5) = -$	5) Coque $x(2,5) = 12682$ $s(2,5) = 270$	5) Usos não energéticos $x(3,5) = 7496$
	6) Bagaço de Cana $x(2,6) = 42872$ $x(2,6) = -$	6) Outros $x(3,6) = 78843$
	7) Outros $x(2,7) = 12817$ $x(2,7) = 1800$	

ESTAGIO 1

$X(1) = 759536$

$S(1) = -2076$

ESTAGIO 2

$X(2) = 693289$

$S(2) = 3556$

ESTAGIO 3

$X(3) = 657282$





















































































































































ESTAGIO 1		ESTAGIO 2		ESTAGIO 3		ESTAGIO 4		ESTAGIO 5	
ENERGIA PRIMARIA		ENERGIA RUTA		FONTES		CATEGORIAS DE DEMANDA		SETORES DE MERCADO	
CODIGO 1.1	ENERGIA HIDRICA	CODIGO 2.1.1	ENERGIA HIDRAULICA	CODIGO 3.1	ENERGIA HIDRAULICA	CODIGO 4.1	ENERGIA HIDRAULICA	CODIGO 5.1	RURAL TOTAL =
VALOR TOTAL =	72535	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	4715
VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	14587	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	0
CODIGO 1.2	ENERGIA DE EN. HIDRICA	CODIGO 2.2	ENERGIA ELETRICA	CODIGO 3.2	ENERGIA ELETRICA	CODIGO 4.2	ENERGIA ELETRICA	CODIGO 5.2	PESCA TOTAL =
VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	56348	VALOR TOTAL =	67419	VALOR TOTAL =	70308	VALOR TOTAL =	352
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	0	PERDAS =	0	PERDAS =	13672	VAR. ESTOQUE =	0
CODIGO 1.3	ENERGIA DE MARES E RIOS	CODIGO 2.3	IMPORT. EN. ELETRICA	CODIGO 3.3	LENHA	CODIGO 4.3	LENHA	CODIGO 5.3	MINERACAO NAO METALICOS
VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	25176	VALOR TOTAL =	25176	VALOR TOTAL =	217
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	0	PERDAS =	0	VAR. ESTOQUE =	0
CODIGO 1.4	ENERGIA MAREMOTRIZ	CODIGO 2.4	LENHA	CODIGO 3.4	CARVAO VEGETAL	CODIGO 4.4	CARVAO VEGETAL	CODIGO 5.4	MINERACAO DE FERRO
VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	25269	VALOR TOTAL =	5364	VALOR TOTAL =	5364	VALOR TOTAL =	301
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	56	PERDAS =	0	PERDAS =	0	VAR. ESTOQUE =	0
CODIGO 1.5	ENERGIA EOLICA	CODIGO 2.5	CARVAO VEGETAL	CODIGO 3.5	BAGACO DE CANA	CODIGO 4.5	BAGACO DE CANA	CODIGO 5.5	MINERACAO DE OUTROS MET.
VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	5364	VALOR TOTAL =	5309	VALOR TOTAL =	5309	VALOR TOTAL =	155
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	0	PERDAS =	0	PERDAS =	0	VAR. ESTOQUE =	0
CODIGO 1.6	FISSAG NUCLEAR	CODIGO 2.6	BAGACO DE CANA	CODIGO 3.6	ALCOOL	CODIGO 4.6	ALCOOL	CODIGO 5.6	INDUSTRIA DE CIMENTO
VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	5429	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	4889
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-45	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-
PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	VAR. ESTOQUE =	-
CODIGO 1.7	COMBUST. FISSAO	CODIGO 2.7	ALCOOL	CODIGO 3.7	USOS NAO ENERGETICOS	CODIGO 4.7	USOS NAO ENERGETICOS	CODIGO 5.7	INDUSTRIA DE CERAMICA
VALOR TOTAL =	5545	VALOR TOTAL =	960	VALOR TOTAL =	258	VALOR TOTAL =	258	VALOR TOTAL =	1748
VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	0	PERDAS =	0	PERDAS =	0	PERDAS =	0	VAR. ESTOQUE =	0
CODIGO 1.8	FUSAO NUCLEAR	CODIGO 2.8	USOS NAO ENERGETICOS	CODIGO 3.8	OLEO PESADO	CODIGO 4.8	OLEO PESADO	CODIGO 5.8	INDUSTRIA DE VIDRO
VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	849
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	VAR. ESTOQUE =	0
CODIGO 1.9	COMBUST. FUSAO	CODIGO 2.9	OLEO PESADO	CODIGO 3.9	GAS DE ALTO FORNO	CODIGO 4.9	GAS DE ALTO FORNO	CODIGO 5.9	DLARIAS CAIEIRAS
VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-
PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	VAR. ESTOQUE =	-

VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	2576	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	-	VALOR TOTAL =	1122
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	0	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	0
CODIGO 1.10		CODIGO 2.11		CODIGO 3.11		CODIGO 4.10		CODIGO 5.10	
LEIHA TOTAL =	34312	GAS DE ALTO FOMN) VALOR TOTAL =	-	SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS VALOR TOTAL =	-	SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS VALOR TOTAL =	-	INDUSTRIA OUTROS NAO MET. VALOR TOTAL =	450
VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	3679	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	0
CODIGO 1.11		CODIGO 2.11		CODIGO 3.11		CODIGO 4.11		CODIGO 5.11	
CARA DE ACUCAR VALOR TOTAL =	6389	SUBPRODUTOS INDUSTRIAIS VALOR TOTAL =	-	CARVAO VAPOR VALOR TOTAL =	600	CARVAO VAPOR VALOR TOTAL =	600	SIDERURGIA DE FERRO E ACO VALOR TOTAL =	1806
VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	0	PERDAS =	-	PERDAS =	0	PERDAS =	0	PERDAS =	0
CODIGO 1.12		CODIGO 2.12		CODIGO 3.12		CODIGO 4.12		CODIGO 5.12	
MANDIOCA VALOR TOTAL =	-	CARVAO VAPOR VALOR TOTAL =	6124	CARVAO METALURGICO VALOR TOTAL =	76	CARVAO METALURGICO VALOR TOTAL =	76	SIDERURGIA DE FERRO LIGAS VALOR TOTAL =	1263
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	2225	PERDAS =	0	PERDAS =	0	PERDAS =	0
CODIGO 1.13		CODIGO 2.13		CODIGO 3.13		CODIGO 4.13		CODIGO 5.13	
BABACU VALOR TOTAL =	-	CARVAO METALURGICO VALOR TOTAL =	11976	COQUE TOTAL =	8242	COQUE VALOR TOTAL =	7727	INDUSTRIA DE ALUMINIO VALOR TOTAL =	2186
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	2546	PERDAS =	222	PERDAS =	0	PERDAS =	0
CODIGO 1.14		CODIGO 2.14		CODIGO 3.14		CODIGO 4.14		CODIGO 5.14	
OLEO DE RESIDUOS UREANOS VALOR TOTAL =	-	IMPORTACAO DE COQUE VALOR TOTAL =	911	GAS DE COQUE VALOR TOTAL =	1398	GAS DE COQUE VALOR TOTAL =	1153	INDUSTRIA OUTROS NAO FER. VALOR TOTAL =	243
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	0	PERDAS =	154	PERDAS =	0	PERDAS =	0
CODIGO 1.15		CODIGO 2.15		CODIGO 3.15		CODIGO 4.15		CODIGO 5.15	
GAS DE RESIDUOS UREANOS VALOR TOTAL =	-	GAS DE AGUA VALOR TOTAL =	-	GAS COMUSTIVEL VALOR TOTAL =	-	GAS COMUSTIVEL VALOR TOTAL =	469	INDUSTRIA OUTROS CA MET. VALOR TOTAL =	1986
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	0	PERDAS =	0
CODIGO 1.16		CODIGO 2.16		CODIGO 3.16		CODIGO 4.16		CODIGO 5.16	
RESIDUOS E SUBPRODUTOS VALOR TOTAL =	-	GAS NATURAL VALOR TOTAL =	564	METANOL VALOR TOTAL =	-	METANOL VALOR TOTAL =	-	INDUSTRIA MECANICA E ELE. VALOR TOTAL =	1490
VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-
PERDAS =	-	PERDAS =	0	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-
CODIGO 1.17		CODIGO 2.17		CODIGO 3.17		CODIGO 4.17		CODIGO 5.17	
CARVAO MINERAL VALOR TOTAL =	5605	DERIVADOS DE PETROLEO VALOR TOTAL =	73415	GAS NATURAL VALOR TOTAL =	564	GAS NATURAL VALOR TOTAL =	564	INDUSTRIA MAT. DE TRANSP. VALOR TOTAL =	2124
VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	390	PERDAS =	4993	PERDAS =	0	PERDAS =	0	PERDAS =	0
CODIGO 1.18		CODIGO 2.18		CODIGO 3.18		CODIGO 4.18		CODIGO 5.18	
IMPOR. CARVAO MINERAL VALOR TOTAL =	8638	IMPOR. DERIV. PETROLEO VALOR TOTAL =	-	HIDROGENIO VALOR TOTAL =	-	HIDROGENIO VALOR TOTAL =	-	INDUSTRIA PETROQUIMICA VALOR TOTAL =	2323
VAR. ESTOQUE =	0	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	-	VAR. ESTOQUE =	0
PERDAS =	0	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	-	PERDAS =	0
CODIGO 1.19		CODIGO 2.19		CODIGO 3.19		CODIGO 4.19		CODIGO 5.19	
CARVAO VAPOR		PETROLEO		GAS DE REFINARIA		GAS DE REFINARIA		INDUSTRIA ELETROQUIMICA	

















































