

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS DE DEMANDA
NO SETOR RESIDENCIAL - UMA ABORDAGEM
BASEADA EM DINÂMICA DE SISTEMAS**

**'DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA'**

ANDRIANO ANTONIO FELIPPE ALVES

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1997

**CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS DE DEMANDA
NO SETOR RESIDENCIAL - UMA ABORDAGEM
BASEADA EM DINÂMICA DE SISTEMAS**

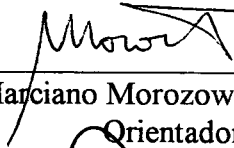
Andriano A. Felipe Alves

‘Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de

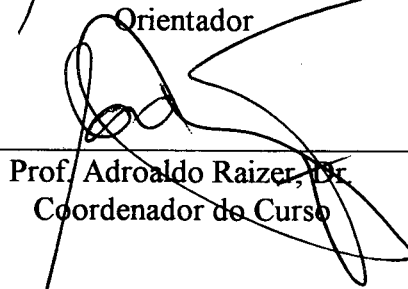
Mestre em Engenharia Elétrica

**Área de Concentração em
Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica,**

e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação’

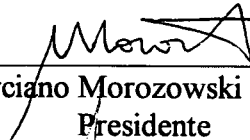


Prof. Marciano Morozowski Filho, D. Sc.
Orientador




Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Coordenador do Curso


Banca Examinadora:



Prof. Marciano Morozowski Filho, D. Sc.
Presidente



Prof. Pedro Paulo Brandão Bramont, Dr.



Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.

**À minha mãe, Salete,
por tudo o que sou.**

**À minha namorada, Giana,
pelo novo rumo em minha vida.**

AGRADECIMENTOS

A todos que me apoiaram e me incentivaram a desenvolver esta dissertação.

Aos amigos do Curso de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, professores, doutorandos, mestrandos, bolsistas, administradores e funcionários, que de alguma forma contribuíram nesta caminhada.

Ao CNPq e à UFSC pelo suporte técnico e financeiro e, em especial, ao LabPlan, local de muita dedicação e satisfação.

À banca examinadora, pelas valiosas discussões e sugestões que enriqueceram não somente este trabalho, mas também os meus conhecimentos.

Ao meu professor orientador, sempre com inovadoras idéias, que abriu para mim a oportunidade de participar de um verdadeiro trabalho de pesquisa, aprimorando enormemente a minha formação.

À minha namorada, tão meiga e ao mesmo tempo sempre tão decidida ao me incentivar a completar esta dissertação.

À minha mãe, que com toda a sua dedicação, confiança e apoio, ajudou a tornar possível a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE GRÁFICOS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Aspectos gerais	1
1.2 - Estrutura da dissertação	2
CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	
2.1 - Introdução	3
2.2 - Conceituação	3
2.3 - Decomposição do Problema de Planejamento	4
2.3.1 - Critério de Decomposição Espacial	5
2.3.2 - Critério de Decomposição Funcional	6
2.3.3 - Critério de Decomposição Temporal	6
2.4 - Técnicas de Decisão no Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica	8
2.5 - Planejamento sob Enfoque Determinístico	9
2.5.1 - Conceituação	9
2.5.2 - Formulação matemática	9
2.6 - Planejamento sob Enfoque Probabilístico	10
2.6.1 - Conceituação	10

2.6.2 - Formulação matemática	11
2.7 - Planejamento sob Enfoque “Incertezas”	12
2.7.1 - Aspectos Gerais	12
2.8 - Conclusão	19
CAPÍTULO 3 - MÉTODOS E MODELOS UTILIZADOS NA PROJEÇÃO DA DEMANDA	
3.1 - Introdução	21
3.2 - Mercado de energia elétrica - caracterização	23
3.3 - Técnicas de Projeção de Demanda	26
3.3.1 - Técnicas de Previsão Determinísticas	27
3.3.2 - Técnica de Previsão Probabilística	32
3.4 - Métodos Qualitativos	35
3.4.1 - Conceituação	35
3.4.2 - Características dos cenários	37
3.5 - Modelos Aplicáveis na Projeção de Demanda a Longo Prazo	38
3.5.1 - Usos e Limitações dos Modelos	38
3.5.2 - Modelos Para Extrapolação Simples	39
3.5.3 - Modelos Econométricos	39
3.5.4 - Modelos de Evolução Demanda - PIB	40
3.5.5 - Modelos Desagregados	40
3.5.6 - Modelos Demográfico-Econométricos	41
3.5.7 - Modelos Insumo - Produto	42
3.5.8 - Modelos para Decomposição do Consumo	42
3.5.9 - Modelos de Usos Finais	42
3.5.10 - Modelos Globais	43
3.5.11 - Modelos Dinâmicos	44
3.6 - Conclusão	45

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DA DEMANDA VIA DINÂMICA DE SISTEMAS

4.1 - Introdução	48
4.2 - Dinâmica de Sistemas	49
4.2.1 - Histórico da Dinâmica de Sistemas	49
4.2.2 - Elementos da Dinâmica de Sistemas	49
4.2.3 - Aplicação da Dinâmica de Sistemas	50
4.3 - Estrutura da modelagem da dinâmica de sistemas	50
4.3.1 - Diagramas causais	51
4.3.2 - Diagramas de fluxo	53
4.3.3 - Fluxos físicos	53
4.3.4 - Fluxos de informação	53
4.3.5 - Variáveis de nível	53
4.3.6 - Variáveis de fluxo	54
4.3.7 - Variáveis auxiliares	54
4.3.8 - Constantes	54
4.3.9 - Simbologia utilizada	54
4.4 - Características da modelagem	56
4.5 - Estudo de caso	57
4.6 - Mercado residencial de energia elétrica - aspectos gerais	57
4.7 - Construção dos diagramas causais da demanda residencial de energia elétrica	58
4.8 - Construção dos diagramas de fluxo da demanda residencial de energia elétrica	64
4.8.1 - Construção dos diagramas básicos e seu equacionamento	64
4.8.2 - Construção do diagrama completo	72
4.9 - Validação do modelo	73
4.10 - Conclusão	80

CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DO MODELO NA CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS	
5.1 - Introdução	81
5.2 - Construção de cenários com dinâmica de sistemas	81
5.2.1 - Alteração no comportamento do PIB	83
5.2.2 - Alteração no comportamento da População	85
5.2.3 - Alteração no comportamento da Tarifa (através da adoção de políticas)	87
5.2.4 - Alteração conjunta de PAPIB e PAPOP	90
5.3 - Construção de cenários de mercado de energia elétrica	94
5.4 - Conclusão	101
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
ANEXO I	111
ANEXO II	117

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.3-1 - Atuação segundo área de abrangência</i>	5
<i>Figura 2.3-2 - Distribuição temporal do planejamento</i>	7
<i>Figura 2.7-3 - Efeito das incertezas na margem de reserva</i>	16
<i>Figura 3.1-1 - Estudos de Mercado e suas Aplicações</i>	22
<i>Figura 3.2-1 - Curva de Carga Cronológica</i>	23
<i>Figura 3.2-2 - Curva de Duração de Carga</i>	24
<i>Figura 3.2-3 - Curvas de Carga Horária de Dias Típicos</i>	24
<i>Figura 3.2-4 - Estrutura da Demanda de Energia Elétrica</i>	26
<i>Figura 3.3-1 - Processo de previsão probabilística</i>	34
<i>Figura 3.4-1 - Processo de construção de cenários</i>	37
<i>Figura 3.5-1 - Cálculo do consumo do setor residencial</i>	41
<i>Figura 3.5-2 - Comportamento cíclico dos sistemas econômicos</i>	45
<i>Figura 4.3-1 - Exemplo de diagrama causal</i>	52
<i>Figura 4.3-2 - Exemplo de diagrama de fluxo</i>	55
<i>Figura 4.3-3 - Exemplos de outras variáveis auxiliares</i>	55
<i>Figura 4.6-1 - Estrutura do mercado de energia</i>	58
<i>Figura 4.7-1 - Interrelacionamentos da variável "População"</i>	59
<i>Figura 4.7-2 - Interrelacionamento unidirecional</i>	60
<i>Figura 4.7-3 - Relação consumo-tarifa</i>	61
<i>Figura 4.7-4 - Relação conservação-consumo</i>	62
<i>Figura 4.7-5 - Diagrama causal do sistema representado</i>	63
<i>Figura 4.8-1 - Módulo do PIB</i>	64
<i>Figura 4.8-2 - Módulo da População</i>	66
<i>Figura 4.8-3 - Módulo do NDA</i>	67
<i>Figura 4.8-4 - Módulo do CDA</i>	69
<i>Figura 4.8-5 - Módulo da Conservação</i>	70
<i>Figura 4.8-6 - Módulo da Tarifa</i>	71
<i>Figura 4.8-7 - Modelo para projeção da demanda de energia elétrica</i>	72

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.3-1 - Critérios de decomposição do problema de planejamento</i>	4
<i>Tabela 2.7-1 - Matriz de arrependimentos</i>	19
<i>Tabela 3.2-1 - Fatores de uma Curva de Carga</i>	25
<i>Tabela 4.9-1 - Resultados da simulação do modelo</i>	74
<i>Tabela 4.9-2 - Comparação da evolução do PIB entre resultado do modelo e série histórica</i>	75
<i>Tabela 4.9-3 - Comparação da evolução da população entre resultado do modelo e série histórica</i>	77
<i>Tabela 4.9-4 - Comparação da evolução do consumo de energia elétrica entre resultado do modelo e série histórica</i>	78
<i>Tabela 5.2-1 - Fatores de multiplicação para a Análise I</i>	82
<i>Tabela 5.2-2 - Fatores de multiplicação para a Análise II</i>	82
<i>Tabela 5.2-3 - Análise I somente com alteração na evolução do PIB</i>	83
<i>Tabela 5.2-4 - Análise II somente com alteração na evolução do PIB</i>	84
<i>Tabela 5.2-5 - Análise I somente com alteração na evolução da População</i>	86
<i>Tabela 5.2-6 - Análise II somente com alteração na evolução da População</i>	86
<i>Tabela 5.2-7 - Análise I somente com diferenciação de política de tarifas</i>	88
<i>Tabela 5.2-8 - Análise II somente com diferenciação de política de tarifas</i>	88
<i>Tabela 5.2-9 - Resultados fixos para a Análise I</i>	90
<i>Tabela 5.2-10 - Resultados fixos para a Análise II</i>	91
<i>Tabela 5.2-11 - Resultados para a Análise I (com alteração em PAPIB e PAPOP)</i>	91
<i>Tabela 5.2-12 - Resultados para a Análise II (com alteração em PAPIB e PAPOP)</i>	92
<i>Tabela 5.3-1 - Premissas dos cenários de mercado</i>	94
<i>Tabela 5.3-2 - Resultados para o Cenário I (com alteração em todos os multiplicadores da Tabela 5.2-1)</i>	95
<i>Tabela 5.3-3 - Resultados para o Cenário II (com alteração em todos os multiplicadores da Tabela 5.2-2)</i>	96
<i>Tabela 5.3-4 - Fatores de multiplicação da Tabela 5.2-1 atualizados para o Cenário I</i>	97
<i>Tabela 5.3-5 - Fatores de multiplicação da Tabela 5.2-2 atualizados para o Cenário II</i>	97

<i>Tabela 5.3-6 - Cenário I</i>	97
<i>Tabela 5.3-7 - Cenário II</i>	98

LISTA DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 2.7-1 - Evolução das projeções do preço do petróleo (Fonte: Crousillat [4])</i>	14
<i>Gráfico 4.9-1 - Comparação da evolução do PIB entre resultado do modelo e série histórica</i>	76
<i>Gráfico 4.9-2 - Comparação da evolução do Consumo de energia elétrica entre resultado do modelo e série histórica</i>	79
<i>Gráfico 5.2-1 - Evolução do Consumo em função do PIB</i>	85
<i>Gráfico 5.2-2 - Evolução do Consumo em função da População</i>	87
<i>Gráfico 5.2-3 - Evolução do Consumo em função da Tarifa</i>	89
<i>Gráfico 5.2-4 - Comparação da evolução da Conservação e da Tarifa para as Análises I e II</i>	93
<i>Gráfico 5.2-5 - Comparação da evolução do Consumo por Domicílio Atendido e do Consumo para as Análises I e II</i>	93
<i>Gráfico 5.3-1 - Tarifas para os Cenários I e II</i>	99
<i>Gráfico 5.3-2 - Análise II, sem Política de Ajuste de Tarifas</i>	100
<i>Gráfico 5.3-3- Cenário II, com Política de Ajuste de Tarifas</i>	100
<i>Gráfico 5.4-1 - Consumo para os Cenários I e II</i>	102

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo discutir a aplicação da Técnica de Dinâmica de Sistemas ao planejamento de sistemas de energia elétrica, através de seu uso na previsão do consumo do mercado residencial.

São apresentados os conceitos básicos do planejamento, assim como aspectos relacionados ao processo de construção de futuros. Apresenta-se, também, uma visão geral dos modelos utilizados tradicionalmente e um natural encaminhamento para a Dinâmica de Sistemas, devido às incertezas oriundas das constantes modificações não somente no sistema de energia elétrica, mas em todo o sistema sócio-econômico.

Em função das variáveis que influem no comportamento da demanda de energia elétrica do setor residencial e do seu interrelacionamento, constrói-se um modelo de testes baseado na Técnica de Dinâmica de Sistemas. Por meio deste modelo, são apresentados os resultados através dos quais busca-se demonstrar que a Técnica proposta, aliada à construção de cenários, é uma alternativa viável na determinação de políticas adequadas e na previsão do consumo do mercado de energia elétrica.

ABSTRACT

The objective of this work is to discuss the use of System Dynamics approach to the electrical energy system planning, through an application to the residential demand forecast.

It is shown the basic concepts of planning, and aspects related with the future construction process. It presents a general view of the models in use and their limitations, leading naturally to a Systems Dynamic approach, that is able to work with frequent changes not only at the electrical system level, but at the socio-economical system as a whole.

With the variables that have influency in the evolution of the electrical energy consumption of the residential sector, it is composed a test model based on the System Dynamics approach. An application of the technique to a realistic power system is presented. This application has shown that the System Dynamics approach, combined with Scenarios Forecasting, is a good methodological alternative to support both supply side and demand side policy formulation and evaluation.

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Aspectos gerais

O planejamento do sistema de energia elétrica tem como objetivo proporcionar energia elétrica aos consumidores com o mínimo custo e com níveis aceitáveis de confiabilidade. Para isso, é necessário conhecer a situação futura da demanda, pois disso depende a escolha do plano ou estratégia de expansão que leva aos melhores resultados.

Desse modo, o planejamento de sistemas de energia elétrica requer, como insumo básico, informações sobre a evolução da demanda. Assim, várias técnicas de previsão de consumo têm sido desenvolvidas, visando um resultado eficaz em termos de planejamento.

Até a crise dos anos 70, o planejamento do sistema de energia elétrica seguia uma metodologia que se adequava à situação de relativa estabilidade até então vigente. As alterações no quadro sócio-econômico mundial refletiram-se no desenvolvimento do sistema elétrico e, por conseguinte, no quadro evolutivo do consumo, levando à necessidade de se rever as relações entre as variáveis que influem no seu comportamento ao longo do tempo. Verificou-se, então, que a evolução da demanda não ocorre de forma isolada, mas é influenciada por parâmetros comportamentais, técnicos e financeiros, cuja difícil previsão amplia as incertezas inerentes ao planejamento a longo prazo.

Como o desconhecimento do futuro pode levar a custos adicionais de expansão e de operação do sistema, uma das metas atuais do planejamento é diminuir o impacto das incertezas, ou seja, deseja-se que o sistema esteja adaptado para uma certa faixa de consumos futuros.

Nesse sentido, o presente trabalho objetiva abordar a aplicação da técnica conhecida como Dinâmica de Sistemas à previsão de consumo (demanda média) de energia elétrica do setor residencial. São discutidas as características básicas desta modelagem e a sua aplicação na representação e análise do comportamento das variáveis relevantes que compõem o quadro evolutivo do consumo de energia elétrica do segmento residencial.

Embora vários métodos tenham sido utilizados para modelar o sistema elétrico e o interrelacionamento entre variáveis endógenas e exógenas, pode-se mostrar que a Dinâmica de Sistemas permite representar adequadamente o comportamento do consumo e facilita a

construção de cenários, levando em conta padrões de comportamento, realimentação de informações e outros fatores relevantes.

1.2 - Estrutura da dissertação

No capítulo 2, tratam-se de aspectos conceituais de planejamento e abordam-se os critérios utilizados para a decomposição deste problema complexo. Apresentam-se, também, algumas definições relativas à demanda de energia elétrica.

No capítulo 3, são apresentadas as principais técnicas em uso nos estudos de previsão de consumo, incluindo as técnicas de cenários e suas características. São apresentados, também, vários modelos tradicionais e seus campos de aplicação.

Apresentam-se, no capítulo 4, os conceitos básicos da Dinâmica de Sistemas, incluindo os diagramas utilizados para a construção de um modelo. Definem-se as características de cada elemento e os princípios de modelagem pertinentes, incluindo a construção e validação do modelo.

Utilizando como objeto de estudo o mercado residencial brasileiro, tem-se no capítulo 5 a construção dos diagramas destinados à análise e projeção da demanda de energia através da construção de cenários, além de algumas considerações resultantes de simulações intermediárias.

O capítulo 6 contém as conclusões da dissertação, em função dos estudos realizados, além de algumas sugestões para posteriores trabalhos.

Ao final, encontram-se dois anexos que contém as equações do modelo construído e os dados históricos.

Capítulo 2 - METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

2.1 - Introdução

Antes de discutir os conceitos relacionados à projeção da demanda de energia elétrica e as dificuldades encontradas nesta projeção, é conveniente abordar algumas definições básicas da estrutura e forma do planejamento de sistemas de energia elétrica.

Desse modo, este capítulo trata de alguns conceitos que permitirão ao leitor compreender as fases do planejamento e os critérios utilizados nos estudos destinados à análise do mercado de energia, bem como a composição de sua curva de carga, além de aspectos relacionados às incertezas a que o mercado futuro está sujeito.

2.2 - Conceituação

O planejamento de sistemas de energia elétrica é um processo pelo qual se definem as capacidades dos equipamentos e instalações e as datas de entrada em operação das unidades geradoras e demais componentes do sistema. Os estudos de planejamento visam, portanto, a estabelecer uma configuração adequada do sistema elétrico em cada ano dentro do horizonte de planejamento.

De forma simplificada, pode-se dizer que o planejamento é o estudo do comportamento de um conjunto de variáveis e a consequente ação para alcançar determinados objetivos ou estágios. No caso dos sistemas de energia elétrica, as variáveis de interesse são aquelas que de alguma forma influem na evolução deste sistema. Os objetivos a serem alcançados são, a grosso modo, o suprimento da carga com um nível de qualidade satisfatória (que atenda às condições básicas de operação e segurança) e com um custo mínimo.

Quando se coloca alguma discussão a respeito de custos, lembra-se inicialmente dos custos de expansão do sistema ligados a obras e equipamentos e, a seguir, dos custos operacionais e de manutenção. Destaca-se, porém, que há outros fatores que devem ser

considerados e que têm impacto sobre as decisões de expansão. Embora mais complexos em sua quantificação, os custos econômicos e sociais (custos de racionamento e interrupções) também devem estar incluídos no custo total da expansão.

2.3 - Decomposição do Problema de Planejamento

O planejamento do sistema de energia elétrica é um problema complexo e de grande porte. Sendo assim, é usual decompor o problema em subproblemas mais simples, os quais podem ser resolvidos de maneira eficiente, tanto do ponto de vista computacional como no que se refere à identificação das premissas básicas e à análise dos resultados. Tradicionalmente, o planejamento é dividido segundo sua abrangência espacial, funcional e temporal, conforme indicado na Tabela 2.3-1:

Tabela 2.3-1 - Critérios de decomposição do problema de planejamento

CRITÉRIO	ETAPAS
Espacial	Nível nacional Nível regional Nível local
Funcional	Geração (produção) Transmissão (transporte) Distribuição
Temporal	Longo Prazo ($N^1 + 15$ a $N + 30$) Médio Prazo ($N + 5$ a $N + 15$) Curto Prazo ($N + 3$ a $N + 5$)

¹ N: Data atual

2.3.1 - Critério de Decomposição Espacial

De acordo com a visão que uma empresa tem do seu mercado, tomam-se as atitudes e decisões necessárias ao cumprimento das responsabilidades na sua área de abrangência. Assim, o âmbito de atuação de uma empresa nacional é diferenciado em relação ao de uma empresa de âmbito regional ou local.

Esta diferenciação pode ser definida, para o caso do sistema brasileiro, conforme mostrado na Figura 2.3-1.

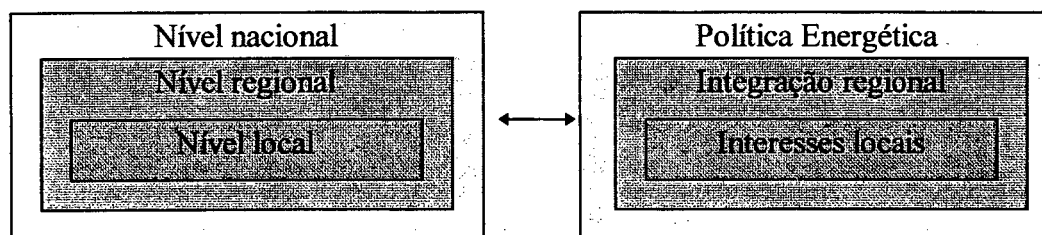


Figura 2.3-1 - Atuação segundo área de abrangência

2.3.1.1 - *Nível nacional*

Neste nível está situada a coordenação de todo o setor elétrico, o que define as diretrizes governamentais de política energética.

2.3.1.2 - *Nível regional*

Aqui situam-se aquelas empresas que, de acordo com as diretrizes gerais do setor, são responsáveis pelo suprimento da área sob sua abrangência, suprindo as necessidades das concessionárias de sua região, quando necessário. Também realizam a interligação entre as regiões, de modo a aproveitar as reservas de geração, reduzindo a necessidade de expansão individual das concessionárias.

2.3.1.3 - *Nível local*

Empresas que têm sua esfera de atuação dentro de cada estado situam-se neste nível. Apesar de que as diretrizes gerais podem ser levadas em conta no planejamento, grande importância é dada aos interesses do estado ou localidades sob sua responsabilidade.

Cabe a estas empresas, muitas vezes, a opção de decidir se é mais vantajoso aumentar o parque gerador ou adquirir energia da empresa regional de sua área, respeitando as possibilidades desta última em atendê-la.

2.3.2 - Critério de Decomposição Funcional

De acordo com a Tabela 2.3-1, há três segmentos que compõem o sistema de energia elétrica. O sistema de geração é definido a partir das necessidades de consumo e de estudos de viabilidade, e vem cada vez mais sendo influenciado pelos requisitos de transmissão. Como as grandes usinas tendem a estar distantes dos centros de carga, são necessários grandes troncos de interligação, sujeitos às restrições de energia e de potência. O planejamento dos sistemas de distribuição é realizado em etapas independentes, pois não depende diretamente da composição estrutural ou conjuntural dos sistemas de geração e transmissão.

2.3.3 - Critério de Decomposição Temporal

Devido às grandes proporções do sistema elétrico brasileiro, os estudos necessários para o suprimento da carga devem ser iniciados anos antes de sua ocorrência.

Assim, a longo prazo, definem-se as diretrizes básicas do planejamento, atendendo-se aos objetivos estratégicos da política energética. Levam-se em conta as perspectivas macroeconômicas, o estudo de novas tecnologias (por exemplo, de transmissão), a possibilidade de substituição de energéticos (considerando também o dimensionamento e gestão dos seus estoques) e outros aspectos de caráter qualitativo, como a análise do impacto ambiental. Deve-se dispor, como base para estes estudos, de cenários de mercado e de uma relação das fontes disponíveis de energia e custos associados. Também se fazem estudos de inventário e avaliações relacionadas aos componentes de maior porte do sistema (geradores, redes de transmissão e interligações).

Como pode-se ver na Figura 2.3-2, desta etapa resulta uma configuração de referência que permite direcionar os estudos no horizonte de médio prazo. Definem-se aí itens como a distribuição espacial de usinas e troncos de transmissão e o seu dimensionamento apropriado para suprir a carga prevista. Alterações na capacidade das interligações e da geração, no que diz respeito a capacidade instalada, também são

estudados. Há, então, um detalhamento das características do sistema definidos na etapa anterior.

Os resultados da segunda etapa configuram um plano de referência para os estudos de curto prazo, nos quais são detalhados os projetos que serão priorizados (no caso, principalmente, de restrições financeiras). Também se fazem estudos relativos à forma de tarifação dos serviços prestados (custos da geração, transmissão, de cortes de energia etc.).

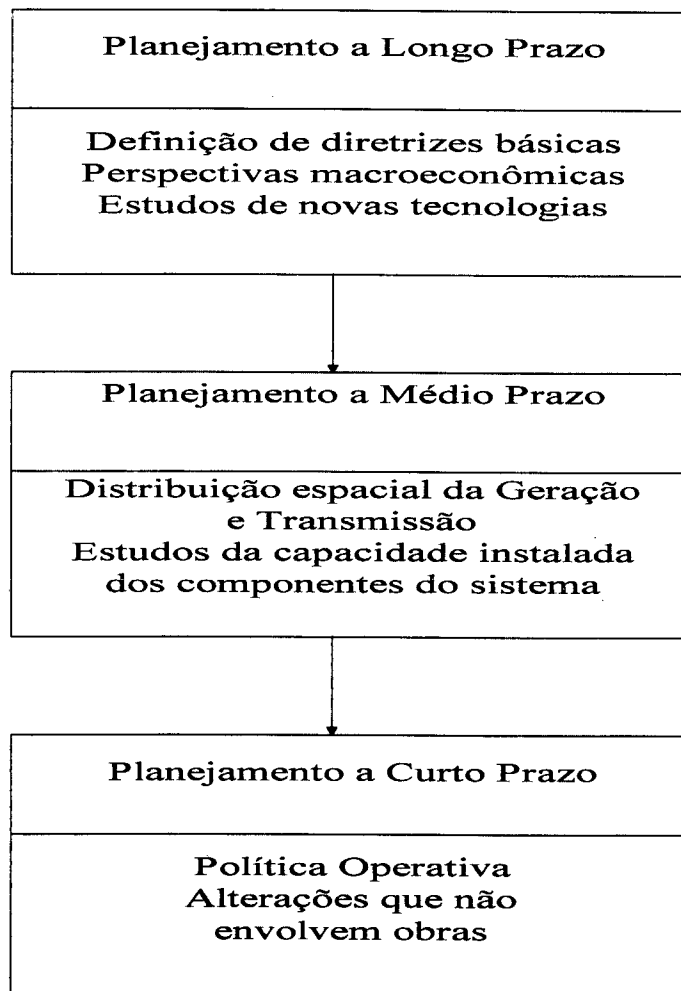


Figura 2.3-2 - Distribuição temporal do planejamento

No caso brasileiro, neste período deve-se ter atenção especial no que se refere às usinas térmicas. Devido ao menor prazo de maturação destas em relação às hidráulicas de

maior porte, podem servir como uma base de ajuste no plano, em função de mudanças na previsão de carga (supondo que haja um aumento na previsão), estendendo-se esta avaliação até o horizonte de médio prazo.

Analisando a questão financeira, tem-se nesta etapa os estudos finais no que se refere às fontes de recursos para o efetivo início de construção dos projetos priorizados, englobando os custos desde a etapa de geração até os componentes do sistema tais como subestações e transformadores.

É importante salientar que os estudos nas três etapas devem ser feitos de forma continuada e com fluxo constante de informações. O primeiro se deve ao fato de que mudanças no ambiente podem afetar o planejamento desde o longo prazo (uma nova tecnologia para transmissão de energia) até o curto prazo (alterações abruptas na economia ocasionando retração da demanda). No que toca ao fluxo de informações, leva-se em conta que diferentes configurações de referência estabelecidas no longo prazo podem resultar em projetos diferentes a serem definidos no curto prazo (seja do ponto de vista espacial, temporal ou funcional). Por exemplo, uma usina geradora prevista em um certo plano pode vir a ser substituída por uma interligação a entrar em operação em outra data e outra região caso os custos se tornem menores face a uma nova conjuntura econômica.

Com isso, pretende-se colocar que o processo tende a ser cada vez mais dinâmico, exigindo que o acompanhamento da evolução do sistema seja tanto mais frequente quanto mais próximo o horizonte de planejamento. Na prática, os estudos de longo prazo do sistema elétrico brasileiro têm sido realizados com intervalos em torno de cinco anos entre um plano e outro (como os Planos 2010 e 2015). Os de curto prazo têm um período de revisão de um ano, podendo ocorrer alterações em função das mudanças nas variáveis que afetam o estudo nesta última etapa.

2.4 - Técnicas de Decisão no Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica

Em função das características de cada horizonte de planejamento, vistas anteriormente, adota-se a técnica de decisão mais adequada. Cita-se, aqui, uma distinção bastante clara entre os conceitos de previsão e decisão, conforme definido em uma síntese da Eletrosul [13]:

- **Previsão:** refere-se a um futuro que não depende das decisões de um planejador (ou de uma organização). Se as informações fossem perfeitas, planejadores de diferentes organizações produziriam resultados iguais ou muito semelhantes;

- **Decisão:** refere-se à atitude que um planejador (ou uma organização) irá adotar em função das previsões que tem ao seu dispor. A mesma previsão poderá levar a diferentes ações por parte de uma empresa, dependendo de seus objetivos, recursos etc.

Sendo assim, são mostradas a seguir as técnicas de decisão adotadas no planejamento, levando em conta os diversos tipos de incerteza, quais sejam:

- Planejamento sob enfoque determinístico;
- Planejamento sob enfoque probabilístico;
- Planejamento sob enfoque “incertezas”.

As técnicas de previsão associadas a cada tipo de decisão são abordadas no Capítulo 3.

2.5 - Planejamento sob Enfoque Determinístico

2.5.1 - Conceituação

Estas técnicas constituem a forma mais simples de decisão a nível de planejamento e são adequadas quando as condições sócio-econômicas são estáveis. Ainda pode ser usada, mas não proporciona ao sistema a sua capacidade ótima quando os parâmetros de entrada contém incertezas ou mudanças no futuro.

Basicamente, recai-se na escolha de um plano “ótimo” que contempla o suprimento à demanda com um mínimo custo atualizado, frente a cenários de evolução da demanda construídos sob este enfoque.

2.5.2 - Formulação matemática

A representação matemática da escolha do plano ótimo (aqui chamado de z) é dada por (segundo OLADE [30]):

$$z = \text{Min}_i \sum_{t=1}^T \beta_t (cx_t + dy_t) \quad (2.5-1)$$

s.a.

$$A_t x_t \leq b_t \quad (2.5-2)$$

$$\sum_{\tau=1}^t Ex_\tau + F_t y_t \leq h_t \quad (2.5-3)$$

para $t = 1, \dots, T$

onde

- x_t - vetor que contém as opções de expansão da etapa t
- c - vetor de custos de construção
- y_t - variáveis de operação na etapa t (geração em cada planta etc.)
- d - vetor de custos de operação
- β_t - fator de atualização para a etapa t
- b_t, h_t - vetores de recursos

A equação (2.5-2) representa as restrições nas decisões de construção (restrições financeiras, datas mínima e máxima de instalação de equipamentos etc.). O conjunto de restrições (2.5-3) representa limites operativos (limites de geração, limites de armazenamento, suprimento da demanda etc.). Observa-se que as restrições de operação dependem das decisões de investimento x_t até a etapa t .

2.6 - Planejamento sob Enfoque Probabilístico

2.6.1 - Conceituação

Quando o planejamento do sistema elétrico é feito através de técnicas determinísticas, admite-se que determinado futuro ocorrerá como prognosticado e que o plano de menor custo escolhido é o que melhor se adapta às futuras condições de demanda.

Já sob o enfoque probabilístico, o planejador constrói não apenas futuros determinísticos e considerados certos, mas avalia as outras possibilidades futuras de evolução da demanda associadas a probabilidades de ocorrência supostamente conhecidas.

2.6.2 - Formulação matemática

Quantificando-se em termos de probabilidade a possibilidade de ocorrência de cada futuro, tem-se o seguinte equacionamento (segundo OLADE [30]):

$$\sum_{j=1}^n P_j = 1 \quad (2.6-1)$$

sendo n = número de futuros possíveis.

Por conseguinte, a melhor alternativa incluirá não somente a análise dos custos em cada plano de expansão, mas também a probabilidade de realização de cada futuro. Resulta daí uma escolha através do mínimo valor esperado, de acordo com a seguinte formulação matemática:

$$\text{Min}_i E(C_{ij}) = \text{Min}_i \sum_{j=1}^n P_j C_{ij} = \text{Min}_i \sum_{j=1}^n P_j \left(\sum_{t=1}^T \beta_t (cx_t + dy_t) \right)_j \quad (2.6-2)$$

s.a.

$$A_t x_t \leq b_t \quad (2.6-3)$$

$$\sum_{\tau=1}^t Ex_\tau + F_t y_t \leq h_t \quad (2.6-4)$$

para t = 1,....., T

onde

$E(C_{ij})_j$ - valor esperado dos custos da expansão e operação

P_j - probabilidade de cada futuro possível

- C_{ij} - custo da alternativa i para o futuro possível j
 x_t - vetor que contém as opções de expansão da etapa t
 c - vetor de custos de construção
 y_t - variáveis de operação na etapa t (geração em cada planta etc.)
 d - vetor de custos de operação
 β_t - fator de atualização para a etapa t
 b_t, h_t - vetores de recursos

As equações (2.6-3) e (2.6-4) representam as mesmas restrições definidas por (2.5-2) e (2.5-3), respectivamente.

Esta etapa consiste em propor alternativas de expansão para cada futuro construído e calcular os custos de cada alternativa na possível ocorrência de cada futuro. A idéia é procurar a alternativa mais robusta ou, de outra forma, aquela que melhor se adapta a qualquer futuro. Isto se traduz no somatório dos custos associados a cada alternativa, levando-se em conta a probabilidade de ocorrência de cada futuro. Portanto, a alternativa de expansão que apresentar o menor VPL (valor presente líquido), quando não se consideram os pesos de cada cenário futuro, não será necessariamente a melhor. Uma solução poderá ser a melhor caso um dos custos seja bastante alto mas com pouquíssima chance de ocorrer, o que levará a um custo total relativamente pequeno para esta alternativa.

2.7 - Planejamento sob Enfoque "Incertezas"

2.7.1 - Aspectos Gerais

Todo o processo de planejamento está sujeito a um conjunto de restrições, sejam técnicas, financeiras ou de outra ordem, que dificultam a adoção das medidas necessárias pelo planejador em relação ao sistema visado. As decisões, então, tornam-se mais vulneráveis devido ao fato de que raramente se dispõe de informações perfeitas.

Deparando-se com a necessidade de projetar a expansão do sistema elétrico, o planejador deverá levar em conta um conjunto de variáveis em constante evolução. A determinação do desenvolvimento do parque gerador e da transmissão dependerá do

“tamanho” do mercado a ser atendido, o que é função de uma série de fatores, muitos dos quais impossíveis de serem previstos. Com base nisso está calcado o conceito de *incerteza*, ou seja, o desconhecimento das condições do ambiente no futuro, o que pode levar à escolha de decisões ruins, que por sua vez recairiam em custos adicionais de expansão ou mesmo de operação do sistema. Pode ser útil dividir as incertezas em duas categorias, sendo aquelas derivadas de fatores externos e as de fatores internos às empresas do setor elétrico. Segundo Crousillat [4], tem-se como exemplos de incertezas associadas a fatores externos:

- custos de combustíveis;
- crescimento da demanda;
- inflação e taxas de juros;
- desenvolvimento tecnológico, entre outros.

Estes fatores estão fora do controle da empresa, ou seja, compõem um quadro no qual ela estará inserida e ao qual deverá se adequar. Cita-se, como exemplo, as previsões relativas ao preço do petróleo (Figura 2.7-1). O gráfico mostra que, em geral, as previsões têm sido bastante pessimistas (elevados preços do petróleo), o que desencorajaria a opção pela substituição energética. No entanto, verifica-se uma redução nos valores projetados a medida que as projeções tornam-se mais recentes.

Adicionalmente, citam-se aqueles parâmetros associados a fatores internos que podem ser parcialmente, mas não totalmente, controlados pela empresa, quais sejam:

- cronograma de execução de obras;
- custos de operação e manutenção;
- nível de perdas no sistema etc.

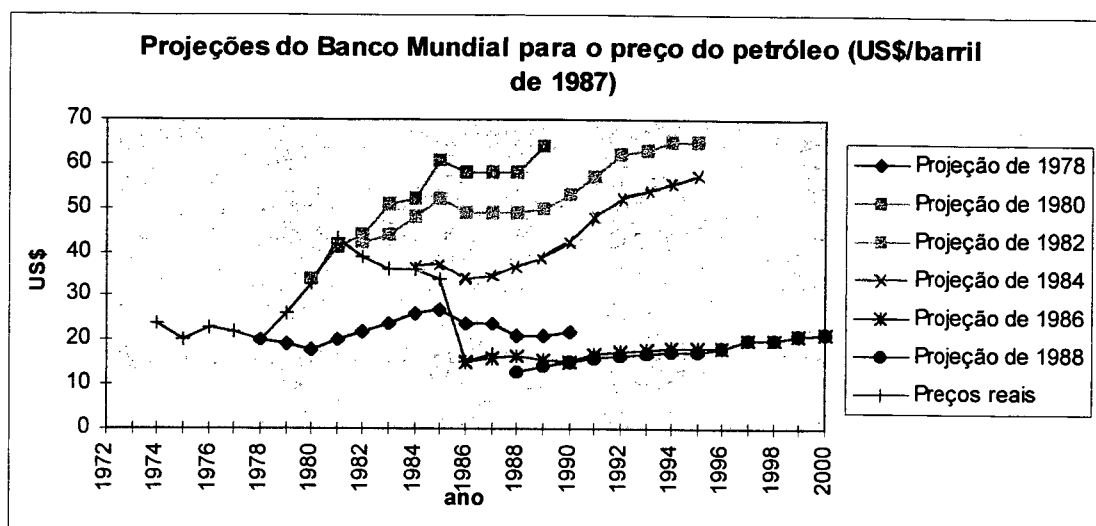


Gráfico 2.7-1 - Evolução das projeções do preço do petróleo (Fonte: Crousillat [4])

O tratamento de incertezas relacionadas a estes últimos parâmetros pode ser feito através da melhoria no gerenciamento da implementação dos projetos e da sua operação, mas as incertezas advindas de fatores externos devem ser analisadas sob um enfoque diferenciado. Assim, a idéia é tentar diminuir o seu impacto nas decisões através da redução dos riscos associados, que se traduzem nas possíveis consequências adversas destas decisões, quando tomadas sob condições de incerteza. A partir da análise dos riscos a que se estará sujeito, o planejador poderá definir que caminho tomar para que as incertezas não comprometam a viabilidade do sistema proposto.

Para alcançar estes objetivos, o planejador deve dispor de um plano de ação, através do qual serão tomadas as decisões apropriadas a cada estágio do planejamento. Estas decisões deveriam, em princípio, estar apoiadas em informações sólidas e confiáveis. Porém a realidade mostra que os dados de entrada para o processo de planejamento contém, geralmente, um alto grau de incerteza, que aumenta com o horizonte de estudo. O desconhecimento do comportamento futuro de certas variáveis, tais como os fenômenos hidrológicos e falhas de equipamentos podem ser em grande parte solucionados através da modelagem matemática. Porém há um conjunto de variáveis fortemente ligados a aspectos econômicos, políticos e de organização social, que constituem importantes fontes de incerteza.

Estas variáveis, constituídas por fatores externos e fora do controle no âmbito das empresas de energia elétrica, exigem um tratamento diferenciado no que se refere a sua previsão e ao seu impacto no planejamento como um todo. Em caso contrário, o risco que o planejador assume é bastante alto e pode levar a resultados de alto custo ou até a uma situação de prejuízo. Pode-se tomar como exemplo o estabelecimento da margem de reserva para um sistema elétrico (Figura 2.7-2). Em caso de subdimensionamento do sistema (margem de reserva insuficiente para suprir a carga em situações críticas), os custos da saída podem ser altos, dependendo do tempo e do tipo de carga atendido. Incluem-se aí, além dos custos econômicos propriamente ditos, os custos sociais de possíveis cortes de carga, que são difíceis de serem quantificados. Por outro lado, havendo superdimensionamento do sistema (grande margem de reserva), há uma boa garantia de continuidade de fornecimento, porém a um custo alto para o consumidor devido ao excesso de investimento, levando à ociosidade de parte do sistema. Isto demonstra que um ponto ótimo deve ser encontrado de forma a otimizar os investimentos.

Outro aspecto que pode ser considerado diz respeito à possibilidade de ocorrência de escassez de fontes de energia, tais como derivados de petróleo. Usinas que hoje podem fazer parte de um plano ótimo poderão se tornar inviáveis na ocorrência de um futuro não previsto de escassez de determinadas fontes energéticas.

Com estas situações, percebe-se a necessidade da correta avaliação dos efeitos das incertezas no processo de planejamento através de metodologias que tratem eficazmente destas questões.

Certas variáveis determinantes no planejamento podem ser bem representadas através de modelos matemáticos que possibilitam um ótimo nível de confiança no que diz respeito ao seu futuro comportamento. Assim, no caso de vazões, parte-se de séries históricas e modela-se a hidrologia através de processos estocásticos. O objetivo da modelagem é obter o máximo possível de informações dos dados históricos, obtendo séries sintéticas com probabilidades de ocorrência conhecidas.

Existem outras variáveis que apresentam grande dificuldade de tratamento, no que se refere a projeções, tais como os custos associados aos projetos (custos de investimento e de operação).

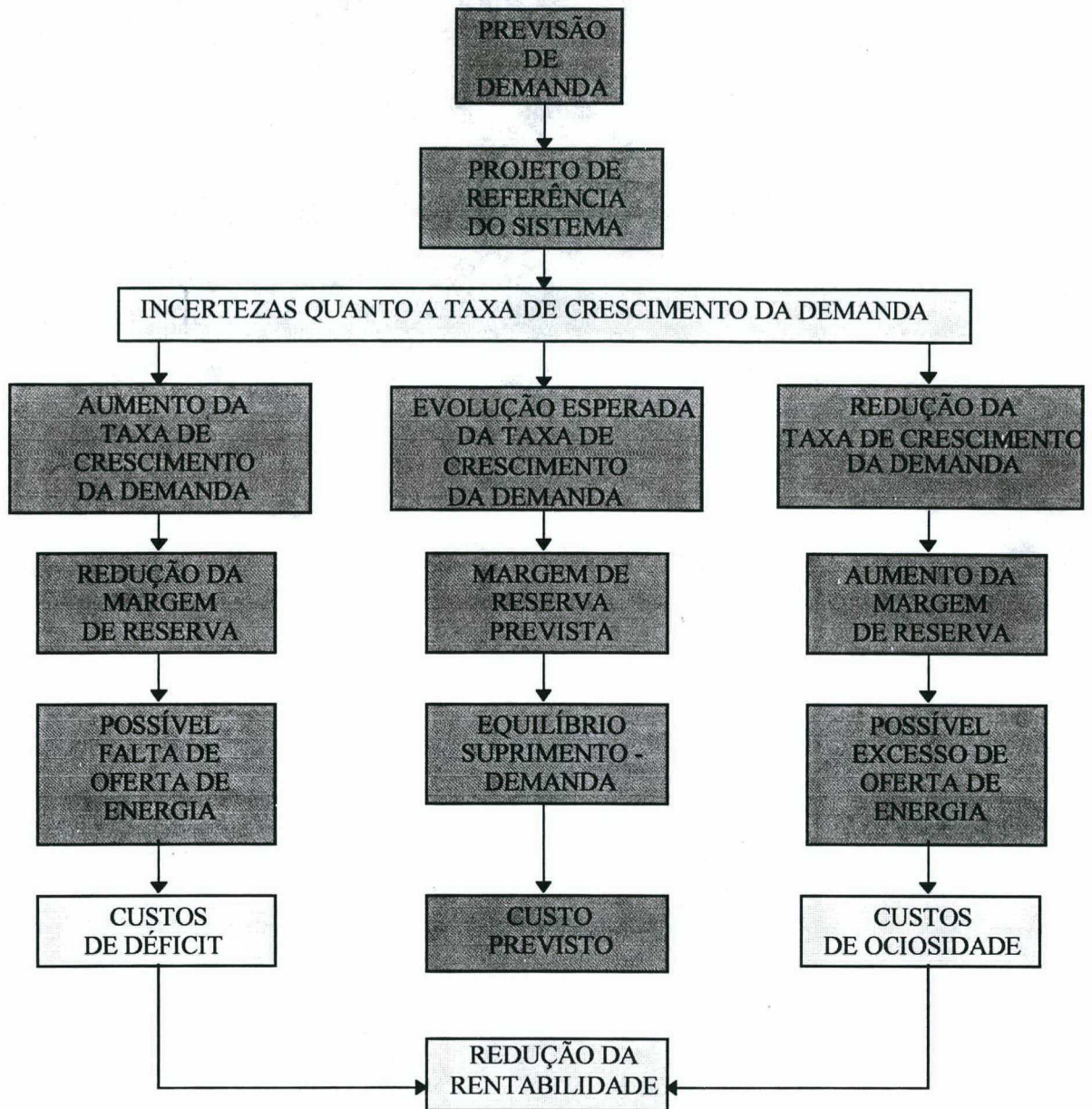


Figura 2.7-2 - Efeito das incertezas na margem de reserva

No caso de investimentos, há que se considerar questões como os prazos de construção e as novas tecnologias. Uma obra que está prevista para entrar em operação em determinada data pode sofrer atrasos devido a restrições financeiras, o que poderia levar a um aumento dos investimentos previstos.

Deve-se levar em conta, também, os efeitos das incertezas que dizem respeito aos custos de operação. Uma situação de escassez de fontes energéticas poderá elevar os custos

de produção de energia, sendo que os custos devidos aos cortes de carga podem ser ainda maiores.

Fatores relacionados ao impacto ambiental refletem-se também no aumento das incertezas na previsão de custos. No caso de usinas a carvão, podem comprometer a produção de energia devido ao aumento do custo ou mesmo indisponibilidade do carvão. No caso de usinas nucleares, deve-se considerar a problemática dos resíduos, que implicarão custos adicionais associados à operação da usina. No caso de projetos hidroelétricos, há que se considerar o impacto causado pelos alagamentos das barragens, de complexa quantificação em termos econômicos.

Estende-se a análise também aos troncos de transmissão, cada mais vez mais longos e de mais alta tensão, exigindo maiores faixas de passagem, o que agrava a questão do impacto ambiental.

Embora as incertezas relativas aos custos tenham reconhecida influência sobre a viabilidade de um plano, a previsão de mercado apresenta-se, ainda, como a questão mais crítica.

A previsão do mercado depende de vários parâmetros que, por si só, já se apresentam de difícil análise. A evolução da demanda é influenciada por variáveis demográficas, ambiente econômico e até decisões governamentais. Alterações na situação econômica acarretarão variações tanto no consumo industrial quanto residencial (além dos outros segmentos menos significativos, como consumidores rurais, geração própria e em obras etc.). Dificuldades financeiras nas indústrias poderão fazer com que estas diminuam o seu consumo de energia elétrica ou mesmo deixem de investir em novas (e possivelmente grandes) unidades consumidoras, diminuindo a necessidade de oferta de energia por parte das concessionárias do setor. No caso do consumidor residencial, a variação no consumo depende não somente do número de conexões de domicílios, mas também da evolução do estoque domiciliar de eletrodomésticos, que por sua vez, depende da situação econômica global.

Decisões governamentais influem no consumo de energia elétrica tanto do ponto de vista específico quanto geral. Específico quando se consideram medidas relativas a tarifas,

por exemplo, e de um modo geral ao se analisar o impacto de decisões econômicas em termos de país e que certamente se refletirão no comportamento dos consumidores.

O preço relativo entre energéticos é também um fator importante na evolução da demanda. Notadamente no setor industrial, novas fontes energéticas, como gás natural, podem se tornar atrativas, fazendo com que a concessionária perca receita caso os consumidores façam a opção por estas fontes alternativas.

A hipótese oposta, qual seja a de falta de oferta, também é plausível quando uma situação de desenvolvimento acima do esperado ocorre, levando ao aumento do consumo de energia elétrica e a uma condição de oferta insuficiente de energia, necessitando-se de planos emergenciais de conservação ou situações de corte de carga.

Neste contexto, o planejamento deve avaliar os riscos tanto de excesso quanto de falta de oferta, ou seja, deseja-se que o sistema esteja adaptado para uma certa demanda futura. Ao se deparar com um ambiente constituído por variáveis de comportamento incerto, as decisões apresentam um alto nível de risco. O objetivo do planejamento é construir um plano que se adapte à maior parte dos futuros, ou uma estratégia de expansão que leve em conta a “árvore” de possíveis futuros.

Nas situações em que os fenômenos, ou eventos, não apresentam regularidade estocástica, diz-se que há um problema de decisão sob incerteza. Neste caso, trabalha-se com a minimização do máximo arrependimento. Inicialmente, define-se um plano de ação para cada futuro considerado, ou seja, considera-se cada previsão de forma determinística e calcula-se o valor atualizado dos custos totais. Em seguida, calcula-se o arrependimento para cada alternativa proposta, que é o valor a ser pago caso não se chegue a cada um dos futuros previstos, selecionando-se a maior para cada futuro.

O cálculo dos arrependimentos, conforme Morozowski [26] é dado por:

$$R_{ij} = C_{ij} - \text{Min}(C_{ij}) \quad (2.7-1)$$

onde

R_{ij}	-	arrependimento
C_{ij}	-	custo da alternativa i para o futuro j
$\text{Min}(C_{ij})$	-	custo para o plano determinístico

Para a escolha da alternativa, utiliza-se a matriz de arrependimentos, mostrada na Tabela 2.7-1.

Tabela 2.7-1 - Matriz de arrependimentos

	<i>Futuro 1</i>	<i>Futuro 2</i>	<i>Futuro 3</i>
Alternativa 1	R ₁₁	R ₁₂	R ₁₃
Alternativa 2	R ₂₁	R ₂₂	R ₂₃
Alternativa 3	R ₃₁	R ₃₂	R ₃₃

Escolhe-se, então, a alternativa que apresentar o menor arrependimento, pois está se optando por uma escolha que leve em conta as piores situações que podem ocorrer. Em resumo, o que se procura é tentar diminuir o “arrependimento” para uma determinada decisão. Paga-se mais pelo custo por unidade para que não se exponha todo o sistema a situações inesperadas que possam vir a ocorrer, o que poderia implicar prejuízos de grande soma à empresa.

2.8 - Conclusão

Foram abordados, neste capítulo, os principais conceitos e os critérios de decisão usualmente utilizados no planejamento de sistemas de energia elétrica.

No planejamento de longo prazo, um aspecto que vem sendo incorporado é o que engloba a incerteza da situação futura da carga, fruto das constantes alterações no ambiente sócio-econômico, o que leva à formulação de decisões flexíveis em termos de expansão do sistema de energia.

Há fatores que podem ser tratados pelas técnicas tradicionais de previsão, porém existem outros que necessitam de um tratamento diferenciado, pois o seu efeito pode ocasionar um grande impacto nos resultados finais. Maiores considerações a respeito da utilização das técnicas e modelos de projeção de demanda e sua adequação a cada horizonte

de planejamento serão vistas no capítulo a seguir, enfatizando a necessidade de métodos e modelos adequados à construção de “cenários de demanda”, que constituem o elemento básico dos processos de planejamento e de tomada de decisão sob condições de incerteza.

Capítulo 3 - MÉTODOS E MODELOS UTILIZADOS NA PROJEÇÃO DA DEMANDA

3.1 - Introdução

De um modo geral, pode-se dizer que existe uma demanda de energia elétrica, cujo atendimento requer uma oferta apropriada de energia. A energia elétrica apresenta características específicas, quais sejam:

- não é um bem estocável e, portanto, deve ser produzido no mesmo instante em que ocorre a necessidade de uso;
- os investimentos no setor são elevados e com longos prazos de maturação;
- parcela significativa da demanda funciona em regime de monopólio (mercado cativo).

Face a essas características, são necessários estudos apropriados que permitam conhecer com antecedência e com o maior grau de precisão possível as necessidades de mercado. Através destes estudos, a empresa poderá determinar ações no sentido de cumprir com a obrigação de atendimento aos consumidores de sua área de concessão. Para isso, é necessário conhecer o comportamento da demanda sob diversos enfoques, adequados aos vários tipos de estudos normalmente conduzidos pelas concessionárias (representados na Figura 3.1-1), quais sejam:

- a) planejamento da expansão: os estudos de demanda permitem dimensionar as necessidades dos consumidores a longo prazo, orientando a definição do sistema adequado (geração, transmissão etc.) a esta demanda projetada;
- b) planejamento da operação: podem ser definidas, a partir dos estudos de demanda, os programas de manutenção, de produção e de comercialização de energia;
- c) estudos tarifários: divide-se o mercado em classes e níveis de tensão, como suporte ao cálculo de tarifas, do custo de serviço, projeções financeiras etc.

d) serviços de energia: notadamente na racionalização do uso de energia, na substituição de derivados de petróleo etc., estudam-se os custos e benefícios dos programas de conservação e substituição, como por exemplo, nos setores de transportes urbanos, autoprodutores industriais e equipamentos domésticos



Figura 3.1-1 - Estudos de Mercado e suas Aplicações

e) estudos econômico-financeiros: estes estudos referem-se ao cálculo das receitas derivadas da venda de energia e dos custos incorridos para fornecer esta energia, que constituem importante elemento para elaboração de orçamentos e construção de fluxos de caixa.

3.2 - Mercado de energia elétrica - caracterização

Dentro da visão geral de planejamento apresentada no Capítulo 2, situa-se a projeção da demanda de energia elétrica. Neste estudo, estão incluídas análises que visam a quantificação da demanda, além de determinar a sua estrutura e abrangência.

A magnitude da demanda compreende duas dimensões principais: a demanda máxima (potência) e a demanda média (energia) (ver Figura 3.2-1). A demanda máxima está relacionada com valores máximos que o mercado irá exigir do sistema supridor, refletindo-se na capacidade instalada do sistema, tanto em termos de produção como transporte (transmissão, subtransmissão e distribuição). A demanda média representa a energia consumida em um determinado período de tempo (hora, ano etc.). No caso do sistema brasileiro, predominantemente hidroelétrico, a demanda média está diretamente ligada ao uso dos estoques de água nos reservatórios.

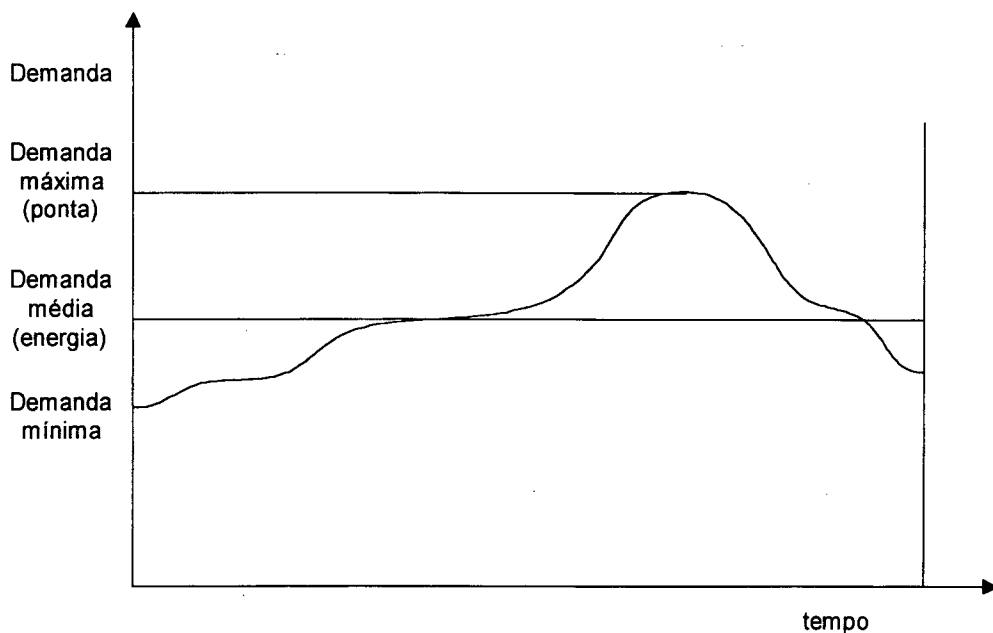


Figura 3.2-1 - Curva de Carga Cronológica

A demanda também pode ser representada por uma curva de duração de carga, conforme mostrado na Figura 3.2-2. A curva de duração de carga é obtida pela ordenação

das demandas cronológicas (horárias, por exemplo) em sequência decrescente. A curva de duração preserva os valores médio, máximo e mínimo de demanda observados na curva cronológica.

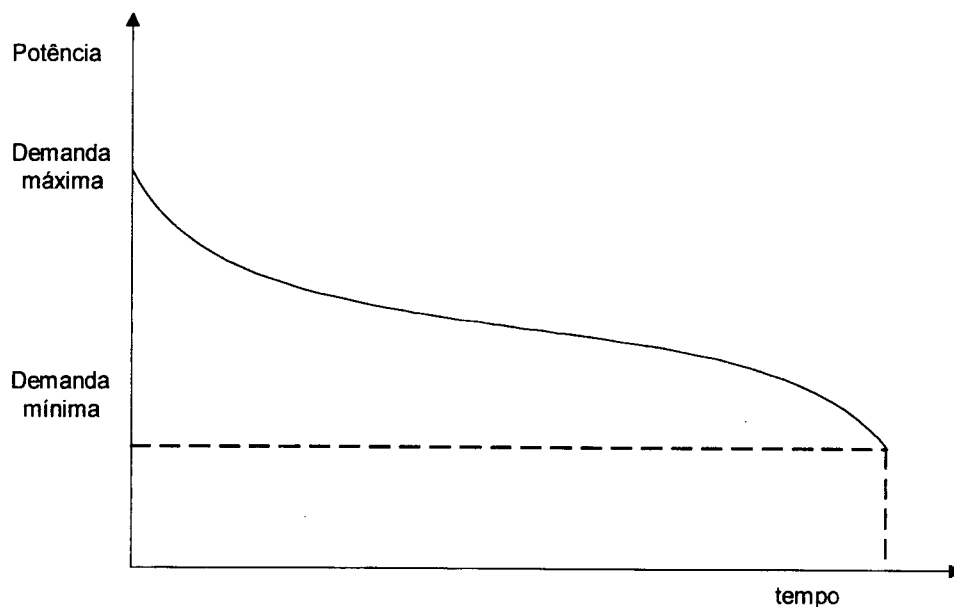


Figura 3.2-2 - Curva de Duração de Carga

Uma outra forma de representar a carga de um sistema é através de curvas de carga cronológicas “típicas”, que procuram sintetizar as curvas de demanda horária média de dias úteis, sábados e domingos, como ilustrado na Figura 3.2-3.

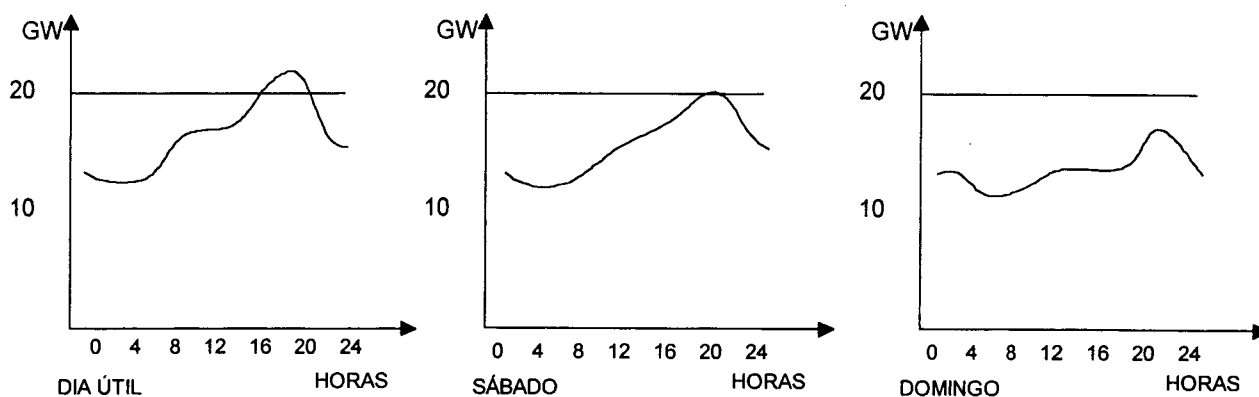


Figura 3.2-3 - Curvas de Carga Horária de Dias Típicos

Além das representações da demanda nas curvas de carga, outras características ou fatores são relevantes para a sua descrição, quais sejam a sazonalidade, a diversidade e o fator de carga. Estes fatores são definidos na Tabela 3.2-1.

Tabela 3.2-1 - Fatores de uma Curva de Carga

<i>Fator</i>	<i>Significado</i>
Sazonalidade	Relação entre cada valor e a média dos valores de uma série (usualmente expressa em percentual ou em “por unidade”).
Diversidade	Relação entre a demanda máxima observada simultaneamente em um conjunto de consumidores e o somatório dos valores máximos observados em cada consumidor, individualmente considerado.
Fator de carga	Relação entre a demanda média em um determinado período e a demanda máxima verificada nesse período.

As curvas de carga podem ser obtidas a nível de segmento de consumo e a nível individual, permitindo identificar com clareza quais são os elementos constituintes da demanda global. Esta análise possibilita, por exemplo, que se avalie a contribuição de cada setor para a demanda máxima de cada sistema de energia elétrica.

A decomposição da curva de carga do sistema permite analisar a estrutura da demanda separadamente, de modo a avaliar a importância de cada segmento e no que diz respeito à parcela de demanda pela qual cada um é responsável.

Tradicionalmente, a estrutura tem sido dividida em nove classes, como pode-se verificar na Figura 3.2-4.



Figura 3.2-4 - Estrutura da Demanda de Energia Elétrica

Para analisar cada categoria de consumidor, existem técnicas e modelos de projeção específicos para cada segmento (demanda máxima e média), dependendo do horizonte de estudo. Dessa forma, são discutidas a seguir as técnicas de previsão de demanda adequadas ao planejamento da expansão, bem como apresentados os modelos propostos e/ou utilizados na projeção de demanda de energia elétrica no horizonte de longo prazo.

3.3 - Técnicas de Projeção de Demanda

O objetivo das técnicas de projeção de demanda é construir um ou mais cenários que permitam caracterizar o mercado futuro, ou seja, “construir um futuro”. Tendo-se uma visão das necessidades energéticas futuras, pode-se então dimensionar o sistema supridor. Esta previsão é feita através de técnicas apropriadas e que podem ser divididas em:

- Técnicas de previsão quantitativas (determinísticas / probabilísticas);
- Técnicas de previsão qualitativas (técnicas de cenários).

As técnicas de previsão quantitativas são aquelas nas quais considera-se que as variáveis têm um comportamento previsível, isto é, trabalha-se com um conjunto de variáveis relevantes e estuda-se a sua evolução temporal. No caso de se trabalhar com extrapolação de tendências atuais, tem-se as previsões ditas “determinísticas”. As previsões

ditas “probabilísticas” incluem valores de probabilidade para eventos futuros, isto é, atribuem-se pesos aos eventos, que representam a sua probabilidade de ocorrência. No caso das técnicas de previsão ditas qualitativas, o planejador pode ou não atribuir “pesos” a certos eventos ou mesmo analisar a importância (e a influência) de determinados fatores no planejamento global.

A seguir, são apresentadas, com mais detalhe, as técnicas descritas acima.

3.3.1 - Técnicas de Previsão Determinísticas

Estas técnicas partem do estudo da evolução de variáveis demográficas, econômicas, sociais e programas setoriais específicos, relacionando-as com o comportamento do mercado e com possíveis distorções na sua evolução. Como o grau de incertezas aumenta com o horizonte de estudo, esta classe de técnicas é aplicável apenas em estudos com horizonte de curto prazo.

Neste horizonte (primeiros três anos de estudo) a previsão de consumo por categoria, índices de perdas e o fator de carga em vendas em grosso tem sido feita com base na Portaria 760 do DNAEE - Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica.

Para a previsão da demanda média, esta metodologia considera nove classes de consumo, de cunho eminentemente comercial: residencial, industrial, comércio e serviços, rural, iluminação pública, poderes públicos, serviços públicos (água, esgoto, saneamento e tração elétrica), consumo próprio e canteiros de obras (está se passando a considerar também o consumo de irrigação). As de maior importância são a industrial e residencial, que respondem por 75% do mercado de energia elétrica no país. A previsão do consumo destas e das outras classes é descrita a seguir.

3.3.1.1 - Consumo residencial

A projeção é obtida pelo produto da estimativa do número de consumidores residenciais e do consumo por consumidor residencial.

A projeção do número de consumidores é elaborada com base na evolução prevista do número de domicílios, resultante de estudo demográfico, e na projeção da taxa de

atendimento, definida como a relação entre o número de consumidores residenciais e o número total de domicílios.

Leva-se em conta a tendência da série histórica e o número de domicílios, previsto no estudo demográfico, considerando diferentes hipóteses sobre o processo de penetração de energia elétrica em cada área; considera-se também possíveis rupturas, localizadas no tempo, do padrão de expansão “tradicional”, tais como: programas de incorporação de consumidores de baixa renda, construção de grandes conjuntos habitacionais, expansão acentuada de áreas urbanas etc.

Nestas condições, o consumo por consumidor residencial é obtido levando-se em consideração:

- a) a análise da tendência histórica;
- b) a correção do efeito da absorção de novos consumidores de baixa renda e, conseqüentemente, baixo consumo (programas especiais);
- c) saturação do crescimento de consumo por consumidor em função do aumento da renda e da conseqüente posse e uso de eletrodomésticos mais eletro-intensivos (por exemplo: condicionadores de ar).

O consumo por consumidor pode ser obtido pela projeção de tendências históricas ou por analogia com áreas semelhantes à área estudada. A informação sobre o estoque de aparelhos eletrodomésticos e características domiciliares é obtida por censos demográficos da FIBGE, pesquisas do PNAD (FIBGE) e/ou através de pesquisas diretas.

3.3.1.2 - Consumo industrial

Pode-se dividir a previsão do consumo industrial em previsão para o curto e médio prazos e para o longo prazo.

No primeiro caso, considera-se a evolução do consumo composta por dois segmentos: tendencial, projetado a partir da tendência histórica, e grandes consumidores, analisados individualmente. A previsão da demanda do segmento tendencial é feita de forma agregada e se baseia na evolução histórica (através de uma curva que se ajusta de forma apropriada). A previsão de consumo dos grandes consumidores é feita através de pesquisa

direta com os setores mais representativos (metalurgia, siderurgia etc.), levando em conta os programas governamentais para cada setor industrial.

No horizonte de longo prazo, faz-se a previsão do consumo a nível regional com base na correlação desta com a renda interna do setor secundário. Daí tem-se definido o consumo total, incluindo as parcelas de energia a serem fornecidas pelas concessionárias e pela autoprodução. Após ajustes feitos em função das características da área em estudo, retira-se a geração líquida dos autoprodutores e chega-se à energia que deve ser suprida pelas empresas concessionárias de cada região ao setor industrial. Em seguida, é analisada a participação percentual de cada setor industrial em relação ao consumo industrial de cada estado e faz-se a projeção desta participação para os anos seguintes. Nesta análise, levam-se em conta:

- a) os efeitos multiplicadores de investimentos das grandes cargas industriais, o que tende a aumentar o consumo de energia também por outros setores (residencial, comercial etc.);
- b) as políticas de desenvolvimento regional e estadual;
- c) as perspectivas de evolução da renda e da população local;
- d) os recursos naturais, principalmente no que se refere aos minerais.

Fazendo-se uma comparação entre a previsão do consumo industrial no curto e médio prazos com o de longo prazo, distinguem-se algumas peculiaridades. Destas, a mais relevante refere-se à relação entre o nível de renda e o consumo de energia elétrica no longo prazo, definido pela evolução macroeconômica. No curto e médio prazos, o comportamento do mercado está mais ligado a medidas específicas de cada setor e à evolução das séries históricas pertinentes.

3.3.1.3 - Consumo comercial e de serviços, poderes públicos, iluminação pública e água, esgoto e saneamento

A previsão do consumo para estas quatro classes é feita por correlação com a residencial. Para a comercial, trata-se separadamente de grandes cargas e para a de serviços públicos, pode-se fazer uma extrapolação de dados históricos.

Para a classe de iluminação pública, além das duas técnicas anteriores pode-se utilizar a informação de expansões dos serviços de iluminação. A previsão de consumo também tem sido feita através do produto das projeções do número de consumidores residenciais e dos índices Watts/poste e poste/consumidor residencial.

Para projetar o consumo em Água, Esgoto e Saneamento são avaliadas as cargas dos sistemas de abastecimento de água e das instalações de recalque e tratamento de esgotos, considerando-se, em geral, nos primeiros anos, as cargas de projeto. Para os anos seguintes, utiliza-se uma correlação com o consumo residencial, ou com o número de consumidores residenciais ou mesmo a extrapolação da tendência histórica de evolução deste segmento de consumo.

3.3.1.3 - Demais classes: Consumo Rural, de Tração Elétrica, Próprio e de Canteiros de Obras

O consumo rural é projetado a partir da tendência histórica e dos programas de eletrificação rural das concessionárias, das cooperativas, dos órgãos municipais, regionais e federais. De forma semelhante, o consumo em tração elétrica é projetado a partir da evolução verificada e dos programas de instalação e expansão desses serviços.

O consumo próprio refere-se à energia consumida pela concessionária e mantém, em geral, uma participação percentual aproximadamente constante em seu mercado. Já o consumo de canteiros de obras é projetado a partir da programação de obras das concessionárias.

3.3.1.4 - Consumo total

É previsto através da soma das previsões dos consumos por classe e é expresso, por exemplo, em GWh, sendo o fluxo de energia entregue ao consumidor ao longo de um ano.

3.3.1.5 - Previsão dos Requisitos de Energia e Ponta

• Requisitos de Energia

Os requisitos anuais de energia, dados em MWano ou GWh, correspondem ao fluxo de energia fornecida pelo sistema supridor. Caso a medição esteja referida à saída das usinas, leva-se em conta as estimativas das perdas existentes no sistema de suprimento. No

dimensionamento das perdas, analisa-se a série histórica do índice de perdas, as distâncias médias de transmissão, os programas de reformas das redes e a evolução verificada e prevista dos suprimentos em grosso e do fornecimento a “forfait”.

- **Requisitos de Ponta**

Os requisitos de ponta correspondem ao estoque de capacidade instalada necessário para que a demanda máxima de energia elétrica possa ser suprida. Este valor permite dimensionar a capacidade máxima do sistema.

Sabe-se que a potência demandada não é uniforme, ao longo de um ano, por exemplo. Caso fosse, o valor corresponderia exatamente à energia do período (no caso, um ano) dividido pelo período. A relação entre a potência média e um dado fator de carga corresponde à potência máxima requerida. Este fator de carga é estimado através de uma correlação linear múltipla com as três principais categorias de consumo (residencial, industrial e comercial).

Quando está se tratando com sistemas interligados, surgem dificuldades relativas à estimação da configuração futura das suas curvas de carga e à coincidência de horário das demandas máximas, o que torna a estimação dos requisitos de ponta mais complexos que os de energia.

Para sistemas isolados (como os da Região Norte), os requisitos de ponta correspondem ao somatório das demandas máximas dos sistemas integrantes. No caso dos grandes sistemas regionais do NE, S, SE e CO, utiliza-se um fator de diversidade de forma a se estimar a demanda de ponta de cada um e a contribuição ao sistema como um todo.

Um aspecto a analisar diz respeito à introdução das tarifas horo-sazonais, que tendem a modificar a curva de carga e, por consequência, os valores históricos de fator de carga. Porém, a tendência é de que os valores de fator de carga aumentem, devido justamente às tarifas citadas.

Com este procedimento, chega-se a um cenário de evolução da demanda para o qual deverá ser desenvolvido um determinado sistema elétrico, incluindo geração, transmissão e demais componentes apropriados.

Um aspecto a ser lembrado é o fato de que, com este método de previsão, a energia elétrica é tratada isoladamente. Não há, por exemplo, a consideração de competição entre energéticos, podendo levar a distorções na oferta futura de energia. Através das técnicas determinísticas faz-se a extrapolação de uma curva constituída por dados de séries históricas e assume-se que o futuro será alcançado conforme o contorno desta curva. Assim, não está embutido neste processo de previsão, por exemplo, que pode ser mais barato para um conjunto de consumidores industriais consumir gás ao invés de eletricidade, acarretando excesso de oferta de energia. Ou, ao contrário, que pode existir futura retração em investimentos em determinadas usinas hidro ou termoelétricas sob a alegação de que há um grande impacto ambiental, existindo a possibilidade de falta, pelo menos temporária, de energia. Mesmo restrições ambientais relativas à operação de usinas térmicas (como a carvão) poderiam acarretar um déficit no suprimento de energia elétrica.

3.3.2 - Técnica de Previsão Probabilística

Um método é proposto em Latham et al. [23] para a previsão da demanda através de técnicas probabilísticas. Consiste em separar o sistema em componentes, de modo a se fazer a previsão separadamente para cada um deles e, após, agrupá-los para se ter a previsão total. Como componentes típicos sujeitos a análise, cita-se:

- população da área de serviço;
- kW/mês por consumidor;
- demanda industrial;
- índice de nível de negócios.

Com a técnica descrita no item 3.3.1 também se trabalha com a desagregação e previsão em separado (previsão para a classe residencial, industrial etc.). A desagregação proposta agora nada mais é do que vários fatores de previsão reunidos em quatro componentes básicos. Assim, o componente identificado como “população da área de serviço” pode englobar a população resultante do seu crescimento local mais aquela originária de movimentos migratórios (devida, por exemplo, a incentivos governamentais). Pode-se citar, também, o componente “demanda industrial” como sendo o somatório da carga de grandes consumidores (analisados individualmente) e da evolução tendencial.

No entanto, o que se constrói agora não são apenas trajetórias determinísticas, como antes, mas trajetórias que são constituídas pela composição da evolução e da probabilidade associada a cada componente do sistema considerado. Isto é realizado após uma projeção inicial dos componentes e a conversão destes dados em médias e variâncias.

Com as respostas de um pacote computacional apropriado, utilizado em Latham et al. [23] para a execução dos cálculos, pode-se expressar as respostas em probabilidades, em uma forma compreensível para o planejador. Tem-se, então, a probabilidade de cada cenário e parte-se para a escolha do plano que minimiza o valor esperado dos custos de expansão.

Terminado este processo, pode-se medir a sensibilidade da previsão realizada frente a mudanças no comportamento das variáveis, que são os componentes do sistema em análise. A atribuição de maior ou menor peso a uma ou mais variáveis e as possíveis mudanças no resultado final (após repetido todo o processo) darão ao planejador informações a respeito da importância de cada variável e da sua influência na previsão total. Com isso, pode-se ter mais atenção para aquelas que têm um impacto maior na previsão. Deve-se apenas ter o cuidado para não se variar a evolução e o peso de muitas variáveis ao mesmo tempo, o que poderia levar a uma perda de sensibilidade na construção dos futuros, pois se estaria construindo uma nova realidade a partir de diferentes evoluções das variáveis (em comparação com as outras).

Em termos de desenvolvimento matemático, a formulação do problema, na forma proposta, constitui-se basicamente de duas etapas. Inicialmente, há a manipulação dos dados para a previsão em separado dos componentes e o cálculo da probabilidade de cada futuro. Na segunda etapa, trabalha-se com os custos de cada alternativa em cada futuro possível. Nesta primeira fase, entende-se como desenvolvimento do problema a descrição dos cálculos numéricos apresentados pelos autores do artigo já referenciado.

Assim, segundo Latham et al. [23], parte-se dos dados históricos e faz-se a sua extrapolação, acrescentando o julgamento humano. O programa computacional utilizado contém uma extensa lógica de ajuste de curvas (equação da reta, parábola, exponencial etc.), usando-se o método dos mínimos quadrados.

Para se prever a variância, emprega-se a aleatoriedade (desvios dos valores acima e abaixo dos dados históricos constituem-se de forma aleatória) e a incerteza do planejador

sobre dados futuros. A partir daí, o planejador deve empregar uma distribuição subjetiva, porém baseada na experiência, levando em conta o histórico de dados. Com isso, tem-se prontas as previsões dos componentes para que se obtenha a previsão global. O processo é ilustrado na Figura 3.3-1, que representa uma previsão com dois ou mais componentes.

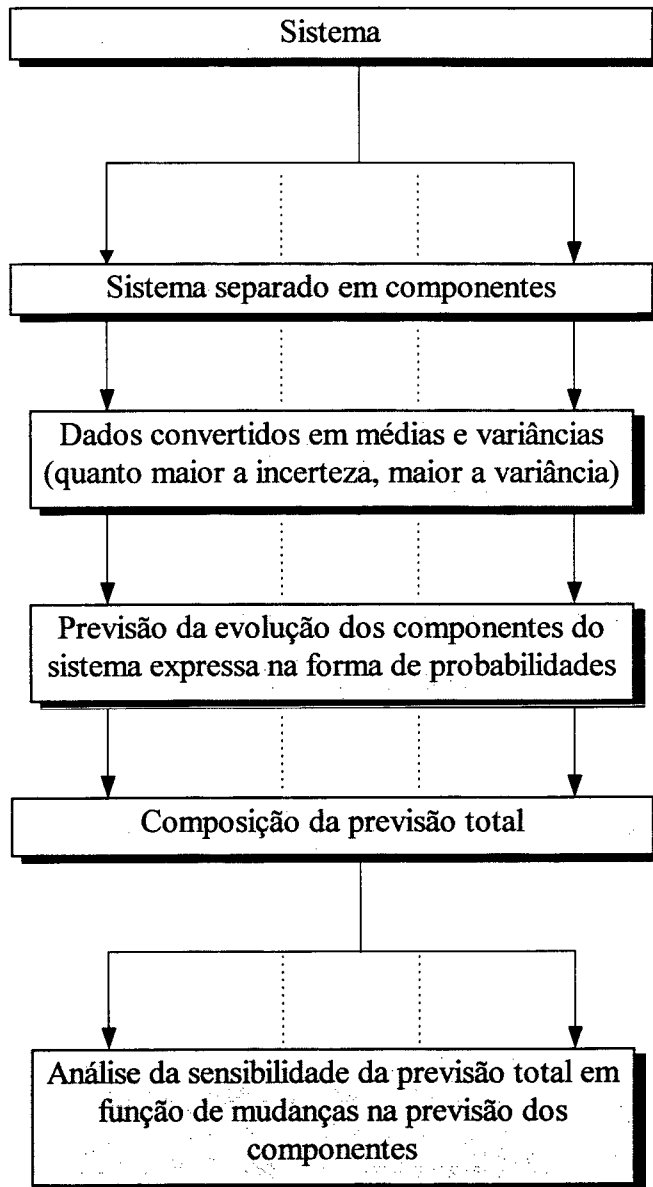


Figura 3.3-1 - Processo de previsão probabilística

A segunda fase do problema corresponde à análise dos custos das alternativas frente aos vários futuros. Trabalha-se com os custos das alternativas e suas probabilidades associadas, optando-se pelo plano que apresenta o menor valor esperado.

3.4 - Métodos Qualitativos

3.4.1 - Conceituação

Conforme visto anteriormente, a quantificação do comportamento das variáveis necessárias para a previsão da demanda de energia elétrica foi feita de forma determinística em um estágio inicial e, após, com atribuição de probabilidades a sua evolução.

No primeiro caso, simplesmente se desconsidera a existência de incertezas no processo de projeção de demanda e são estabelecidos futuros para os quais pode ser calculado um custo para cada uma de várias alternativas. A seguir, passou-se a explicitar estas incertezas através da atribuição de probabilidades às variáveis do sistema, podendo-se dispor, assim, de futuros com uma certa probabilidade de ocorrência.

No entanto, muitas das incertezas com as quais os planejadores são confrontados não são facilmente quantificáveis, pois se tratam de variáveis relacionadas com fatores comportamentais, ambientais e macroeconômicos.

Assim, a idéia de previsão qualitativa deriva da observação de que certas variáveis relevantes para o planejamento não apresentam regularidade estatística, o que impossibilita a sua quantificação por meio de técnicas probabilísticas. Entre estas, pode-se citar:

- situação política internacional;
- desenvolvimento de novas tecnologias;
- prazos de construção de obras;
- restrições ambientais;
- comportamento sócio-econômico.

Partindo-se destas considerações, sentiu-se a necessidade de desenvolver novas formas de previsão da demanda, de modo a incluir neste processo a influência destas

variáveis relevantes que, de outra forma, teriam seus efeitos minimizados ou mesmo desprezados.

Assim, o planejador deve buscar as informações que irão compor uma base de dados que será incorporada ao processo de planejamento. Entende-se base de dados, aqui, não somente as séries históricas das variáveis, mas também o seu interrelacionamento e o seu “peso” no resultado final.

A base de dados deve incluir todas as variáveis consideradas relevantes para o processo de previsão, de forma similar às técnicas tradicionais. A partir daí, é necessário identificar aquelas que necessitam de um tratamento diferenciado para a sua previsão.

Uma vez definidas as variáveis sujeitas às incertezas, pode-se destacar aquelas de caráter determinante (variáveis independentes no contexto global) das dependentes (aquelas que também são relevantes mas podem ter seu comportamento alterado pelas anteriores).

A seguir, deve-se definir de que forma ocorre a influência entre umas e outras. A definição deste interrelacionamento possibilita que o planejador analise a sensibilidade do comportamento de uma variável frente a alterações em outras variáveis, visando identificar as que têm a maior influência no comportamento da demanda de energia elétrica.

Após esta etapa, tem-se condições de construir futuros, considerando o comportamento das variáveis que têm maior peso no processo de previsão. Cada um destes futuros, chamados “cenários”, terá, então, características próprias que o diferenciará dos demais, pois será construído sob hipóteses distintas. De uma forma simplificada, pode-se definir o processo de construção de cenários como mostrado na Figura 3.4-1.

Monta-se, assim, uma base de informações sobre a qual se baseiam os planos a serem adotados pela empresa. Além da análise dos fatores externos à organização empresarial, o planejador deve também dispensar atenção às informações a nível de empresa, o que envolve recursos tecnológicos, humanos e financeiros, pontos fortes e fracos da empresa, entre outros.

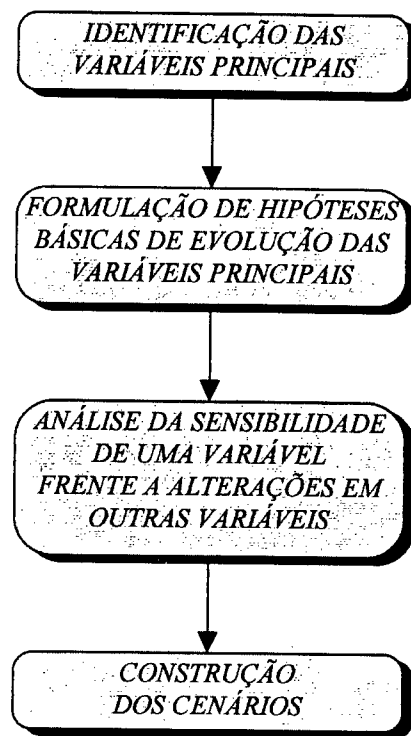


Figura 3.4-1 - Processo de construção de cenários

Com isso, busca-se determinar de que forma os fatores em estudo se comportaram no passado, a situação atual e possíveis tendências emergentes, permitindo construir cenários nos quais a empresa estará inserida, considerando continuidades e/ou rupturas na evolução do comportamento das variáveis que compõem o processo de previsão.

3.4.2 - Características dos cenários

A garantia de que os cenários construídos representam situações plausíveis deriva da sua coerência interna e da representatividade de cada um deles no que se refere ao resultado final da evolução e composição de um conjunto de variáveis. Para que possam ser instrumentos úteis de análise, os cenários devem apresentar as seguintes propriedades:

⇒ **Relevância:** Os eventos que compõem cada cenário devem ser importantes do ponto de vista do impacto que causam na previsão.

- ⇒ **Identidade:** Na sua essência, a técnica de cenários deve prover um conjunto de alternativas que favoreçam a tomada de decisões, o que será facilitado se for possível realizar claras distinções entre os futuros apresentados. Evita-se, portanto, que dois (ou mais) cenários tenham características básicas semelhantes.
- ⇒ **Coerência e plausibilidade:** Um cenário é a representação de um futuro possível no qual deverá haver concordância no comportamento das variáveis. Por exemplo, não seria lógico imaginar uma economia em clima de recessão e com retração de investimentos juntamente com elevação dos níveis de emprego.
- ⇒ **Transparência:** Todo o processo de planejamento tem por objetivo fornecer ao decisor opções claras, de modo a se determinar o melhor caminho para uma empresa, seja com relação a novos investimentos, mercado consumidor etc. A opção por um ou outro cenário é facilitada quando cada cenário está claro e transparente. Muitas informações e opções apresentadas de forma difusa e desorganizada tendem somente a confundir e complicar a tomada de decisões.

3.5 - Modelos Aplicáveis na Projeção de Demanda a Longo Prazo

3.5.1 - Usos e Limitações dos Modelos

Como descrito anteriormente, os sistemas estão sujeitos a variações (bruscas ou não) que, muitas vezes, são difíceis de serem previstas. Devido às características dos sistema elétrico (e, de um modo geral, do sistema sócio-econômico que o envolve) não é possível testar um conjunto de hipóteses e suposições sobre o próprio sistema real. Assim, busca-se construir modelos que possam auxiliar na visualização do caminho que se deve seguir.

No caso do planejamento, os modelos são utilizados para analisar as consequências de possíveis ações sobre o sistema real através de um processo de simulação.

Para isso, o modelo deve conter os parâmetros básicos do sistema que se pretende representar, com as simplificações necessárias para que não se torne a própria realidade, pois se estaria retornando à situação de dificuldade de estudo e análise do sistema real. Além disso, não é verdade que mais informação reduza erros sempre. Toda informação é acompanhada de incertezas - quer sobre as quantidades mensuradas, quer sobre seu

comportamento atual e sua evolução futura. Quanto maior o nível de detalhamento, maior a complexidade e, por conseguinte, a incerteza resultante das incertezas individuais e, mais ainda, de sua interação.

As simplificações não devem limitar a representatividade do modelo, ou seja, não devem prejudicar as conclusões do estudo. Deve-se dispor, ainda, de certa flexibilidade que permita investigar as situações de maior relevância, ou seja, um nível de representação que dê condições de simular o maior conjunto possível de eventos que podem ocorrer no sistema real, respeitando o grau de simplificação já mencionado.

Como forma de estabelecer uma hierarquização dos modelos existentes (adotando a descrição de Araújo [1]), pode-se relacioná-los a partir do menos complexo, aumentando o grau de complexidade com o objetivo de se conseguir previsões com menores erros. Os modelos descritos adiante compreendem também aqueles utilizados para a projeção do mercado como um todo, situação em que a demanda de energia elétrica é o resultado de uma otimização energética global.

3.5.2 - Modelos Para Extrapolação Simples

Para uma determinada área, monta-se uma base de dados para um período de tempo correspondente a um passado próximo. A partir daí, realiza-se uma extrapolação dos dados (numérica e/ou gráfica) de forma a se obter as projeções de demanda para o futuro. A precisão deste tipo de modelo depende do comportamento das variáveis analisadas, que devem manter o mesmo ritmo de evolução que o observado no período histórico. Para horizontes de planejamento curtos, esta hipótese é aceitável, o que não ocorre para previsões de longo prazo.

3.5.3 - Modelos Econométricos

Estes modelos baseiam-se na relação existente entre o consumo de energia elétrica e a evolução de indicadores econômicos (representados normalmente pelo PIB - Produto Interno Bruto), resultando na previsão de carga de uma região. Poderia-se trabalhar com os itens “correlação entre a demanda de energia elétrica e o PIB” e “análise setorial da demanda” de uma forma separada em relação à análise econométrica. Neste trabalho, no

entanto, preferiu-se incluir as duas modelagens acima citadas como uma variação da modelagem econométrica, pois apresentam as características básicas desta última.

3.5.4 - Modelos de Evolução Demanda - PIB

Dentro da perspectiva de análise econométrica, esta modelagem é a mais simples. Parte, segundo Araújo [1], da relação agregada

$$E = \alpha \cdot Y^\alpha P^\beta \quad (3.5-1)$$

sendo

E = consumo agregado de energia

P = preço médio da energia

Y = PIB (Produto Interno Bruto)

α e β = elasticidades renda e preço do consumo de energia elétrica

Neste modelo, admite-se que o crescimento do consumo de energia elétrica acompanha o ritmo da economia, ou seja, pressupõe-se que o sistema manterá uma característica de equilíbrio em relação ao momento inicial de previsão. Sabe-se, no entanto, que as relações poderão ser alteradas ao longo do tempo, além de que outros parâmetros não econômicos podem influir nas taxas de evolução do consumo.

3.5.5 - Modelos Desagregados

O crescimento do consumo pode ocorrer com taxas diferentes para os diversos setores da sociedade, dependendo da situação econômica do país. Isso leva a um maior aumento do consumo por parte da indústria do que para o setor de serviços, por exemplo. Desse modo, busca-se representar o consumo total em setores representativos, agrupados como segue:

- setor primário: agricultura;
- setor secundário: siderurgia, indústria química, metalurgia, materiais de construção e restante da indústria;

- setor terciário: residência, comércio e serviços.

Com isso, pode-se avaliar separadamente cada setor, ou seja, a evolução do consumo para cada um e suas projeções, adotando-se uma taxa de crescimento relacionada a cada comportamento individual. O resultado final será obtido por uma ponderação de todas as previsões, considerando o “peso” de cada setor na economia como um todo.

3.5.6 - Modelos Demográfico-Econométricos

Os modelos demográfico-econométricos (exemplificados na Figura 3.5-1) permitem levar em conta não só as interrelações do consumo de energia elétrica com as variáveis econômicas, mas também a influência dos fatores relacionados à população (demografia, hábitos de consumo etc.). Desse modo, pode-se trabalhar com um enfoque sócio-econômico mais amplo, incluindo a influência dos hábitos de uso da energia, dos deslocamentos populacionais e das taxas de natalidade e mortalidade sobre o consumo de energia elétrica.

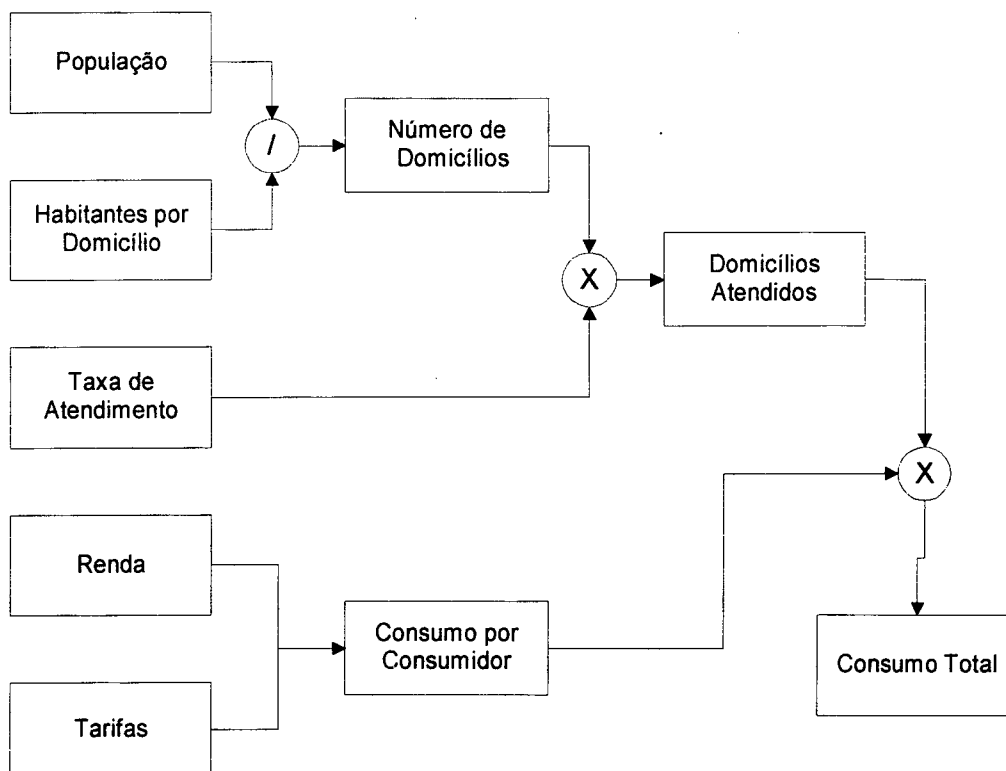


Figura 3.5-1 - Cálculo do consumo do setor residencial

Esta modelagem permite levar em conta as alterações na estrutura do sistema. Assim, a desagregação (citada anteriormente), aliada à análise sócio-econômica, procura explicar a evolução das mudanças dos padrões de consumo, considerando também inovações tecnológicas.

Por outro lado, esta metodologia pressupõe que o sistema está em equilíbrio, configurando-se uma situação estática. Contudo, a teoria econômica expõe um estado de desequilíbrio dinâmico o que, a longo prazo, pode levar à disparidade nas previsões.

3.5.7 - Modelos Insumo - Produto

Esta modelagem aborda as interrelações entre os diversos setores da economia, vista de forma desagregada. Uma breve apresentação da formulação matemática está em Araújo [1]. Limita-se aqui a análise ao planejamento energético.

Os modelos insumo-produto se prestam a previsões setoriais sob um enfoque macroeconômico. A modelagem relaciona valores de produção de um determinado setor com os produtos consumidos em outros setores, aí incluídas as quantidades físicas e os preços. Apesar de ser um modelo bastante difundido, deve-se levar em conta que a sua formulação apresenta características estáticas no que se refere às interrelações, o que prejudica o seu uso nas condições em que a dinâmica do sistema exerce maior influência.

3.5.8 - Modelos para Decomposição do Consumo

Estes modelos baseiam-se na decomposição do consumo de energia elétrica em parcelas resultantes da variação de diversos fatores, tais como uso intensivo de energia, estrutura econômica, nível de atividade e outros. Apesar de possibilitar a consideração de pontos de inflexão na evolução das variáveis (no caso de regressões, tem-se apenas o comportamento médio sobre o período de análise), uma possível limitação nas informações pode resultar em uma indesejada agregação energética.

3.5.9 - Modelos de Usos Finais

Nesta modelagem, o consumo é desagregado até o nível de uso final da energia elétrica, isto é, análise da demanda para iluminação, aquecimento, cocção, refrigeração, calor de alta temperatura e demais usos nos diversos setores da sociedade. Pode-se, ainda,

desagregar estes setores de forma a se dispor de grupos homogêneos de consumidores, tais como consumidores urbanos e rurais para o setor residencial ou classe de consumo para o setor industrial.

No desenvolvimento desta modelagem, aborda-se inicialmente a questão técnica, que diz respeito à determinação do consumo por usos e fontes de energia, e a questão econômica, ligada à relação existente entre os módulos sócio-econômicos, que são os segmentos de consumo homogêneos.

Uma limitação deste tipo de modelo é a dificuldade de se incluir a análise do comportamento sócio-econômico. Quando inseridos no modelo, parâmetros dessa natureza tendem a tornar o problema mais complexo, dificultando a busca de conclusões mais claras.

3.5.10 - Modelos Globais

Os modelos globais são aqueles que podem ser utilizados quando adota-se, como critério de abrangência, todo o sistema de energia elétrica de um país, envolvendo também outras variáveis que influenciam na evolução deste sistema.

Segundo Araújo [1], houve um bom número de estudos globais nos anos 70, porém colocando a energia em um plano não muito destacado. Existe a crítica que aborda a extrema complexidade com aspectos supérfluos e omissão em características importantes, além do fato de que questões sócio-econômicas não foram suficientemente abordadas nesta modelagem.

Uma conclusão básica a que se pode chegar diz respeito ao comportamento do modelo como consequência das hipóteses adotadas. Sendo assim, os resultados dependerão fortemente dos parâmetros que forem adotados para a construção do modelo.

A partir desta análise, pode-se perceber a necessidade de se dispor de modelos que levem em conta as particularidades de um sistema (não perdendo de vista o fator simplicidade), com o objetivo de mais do que prever valores exatos de variáveis, apontar as tendências de seu comportamento no futuro.

3.5.11 - Modelos Dinâmicos

A filosofia de modelagem do sistema elétrico para fins de planejamento tem sido determinada, em grande parte, pelo comportamento do quadro sócio-econômico do qual ele faz parte. É claro que a relação simplicidade-complexidade, assim como a precisão correspondente dos resultados da previsão, dependerá do horizonte de estudo e da abrangência espacial do problema, originando um modelo ou mais ou menos detalhado. Este nível de detalhamento que, muitas vezes, significa um acúmulo de informações e dados que dificultam as análises e conclusões dos planejadores e decisores é, mais que isso, uma “captação” de mecanismos do sistema real que possam ser, de forma simplificada, representados e simulados.

Um aspecto que comumente faz parte dos laços que conectam certas variáveis diz respeito aos atrasos, tanto em termos físicos (grandezas físicas de um modo geral), como de informação. Com isso, uma ação (ou mesmo uma decisão) que ocorre em um determinado instante, poderá ocasionar consequências somente após passado certo tempo. A modelagem de sistemas dinâmicos permite representar esta característica bastante comum nos sistemas reais.

Outro ponto importante nesta discussão é aquele descrito em Kavrakoglu [21], referindo-se ao comportamento de desequilíbrio de um sistema. O autor enfatiza que, mesmo quando o sistema tende ao equilíbrio, o estado transitório é mais significativo, sendo que as forças que regem o sistema se originam das condições de desequilíbrio. Dessa forma, o sistema está sempre instável, evoluindo de um estado de desequilíbrio para outro.

Estudando-se séries históricas de sistemas relacionados com sistemas econômicos, verifica-se que o comportamento das variáveis tende a seguir ciclos, além das possíveis oscilações que ocorrem no curto prazo.

Quando não se levam em conta as tendências de longo prazo, corre-se o risco de se fazerem previsões a partir de um ponto em que, por causa das variações cíclicas, poderá não haver continuidade da evolução das variáveis conforme o observado até aquele momento, levando a uma diferença entre o previsto e o observado (Figura 3.5-2).

Através da modelagem de sistemas dinâmicos, pode-se representar este comportamento, resultando em um processo de previsão para o longo prazo mais eficaz que os descritos para os modelos anteriores.

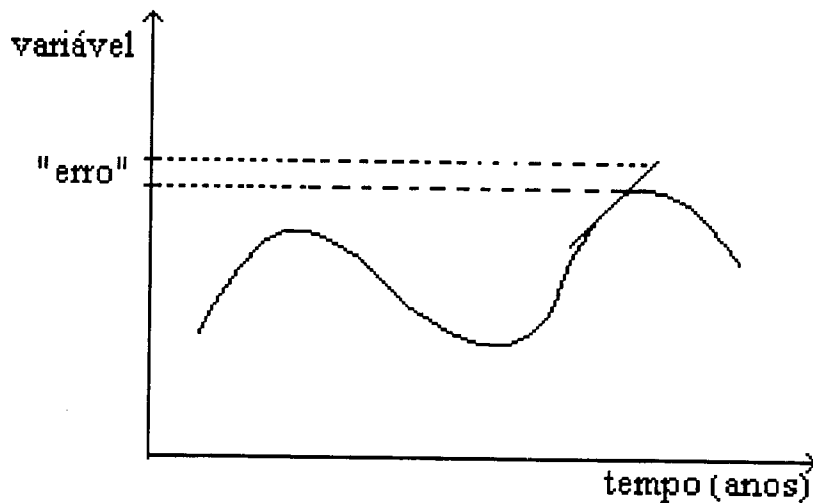


Figura 3.5-2 - Comportamento cíclico dos sistemas econômicos

3.6 - Conclusão

O maior problema que se apresenta ao planejador diz respeito, como já colocado, às incertezas que as variáveis relevantes irão assumir no processo de previsão. Desse modo, quanto menos elaborado o processo de previsão (no que se refere à consideração de incertezas), mais se estará sujeito ao risco de não serem atingidos os objetivos do planejamento, especialmente para um sistema de energia elétrica.

Na verdade, parte-se da idéia de ter sido definido determinado comportamento para as variáveis que apresentam incertezas. Dessa forma, as previsões são feitas sem a consideração de que este comportamento poderá mudar com possíveis alterações no ambiente no qual o sistema elétrico está inserido.

A formulação determinística representa a minimização do valor atualizado dos custos globais de investimento e operação do sistema elétrico. Neste caso, está caracterizada uma situação na qual consideram-se os cenários determinísticos e aceita-se como melhor plano de ação aquele que apresenta o menor custo atualizado, considerando-se que o

comportamento das variáveis que resultaram neste plano não mudará de forma significativa. Esta técnica é mais adequada quando as condições sócio-econômicas são estáveis. Principalmente a partir da crise do petróleo de 1973, os planejadores se depararam com um novo ambiente, no qual a presença de incertezas na evolução das variáveis passou a influir no processo. Assim, o uso de técnicas determinísticas para a previsão passou a não mais proporcionar, nestas condições, a realização da capacidade ótima para os componentes do sistema (e, conseqüentemente, para o sistema como um todo). O trabalho de planejamento que possui parâmetros de entrada contendo incertezas ou mudanças não previstas pode levar a resultados inadequados e até de prejuízo (seja para uma empresa ou mesmo para a sociedade).

Estendendo-se o processo de previsão para o médio e longo prazos e levando-se em conta possíveis variações no comportamento das variáveis que compõem o sistema elétrico, torna-se praticamente impossível prever com boa aproximação a demanda de energia elétrica através do ajuste de dados históricos a funções matemáticas. Assim sendo, torna-se necessário ao planejador a consideração de que cada futuro analisado tem uma probabilidade de ocorrência. A partir daí será tomada a decisão no que se refere à expansão do sistema.

No entanto, ao se considerar explicitamente as incertezas cada vez mais presentes no ambiente como um todo e o seu maior impacto com o aumento do horizonte de planejamento, percebe-se que se estará diante de futuros com probabilidades desconhecidas (lembra-se que técnicas de projeção probabilísticas não são utilizadas no caso do sistema brasileiro). Caracteriza-se aí uma situação na qual é necessário um tratamento diferenciado ao planejamento, necessitando-se mais que modelos sofisticados que tratam as variáveis de forma complexa, de técnicas que englobem estratégias de ação e minimização de riscos, pois a previsão dos eventos inesperados não é bem realizada somente pelos modelos matemáticos.

Do exposto acima, conclui-se que, mesmo sendo de caráter basicamente qualitativo e sujeito à subjetividade e experiência do planejador, a consideração de incertezas através da técnica de cenários se apresenta como uma ótima ferramenta de previsão. Aliado a isso, pode-se verificar que a modelagem do sistema englobando suas características dinâmicas proporciona maior confiabilidade em termos de resultado (além da simplicidade de

formulação). Sendo assim, a simulação através do uso da Dinâmica de Sistemas para o desenho de cenários será objeto de estudo para aplicação em sistemas de energia elétrica. No próximo capítulo serão vistas as características desta Técnica e, a seguir, sua aplicação no setor residencial de consumo.

Capítulo 4 - MODELAGEM DA DEMANDA VIA DINÂMICA DE SISTEMAS

4.1 - Introdução

Em sistemas complexos, como é o caso dos sistemas de energia elétrica, tem-se um grande número de variáveis, a maioria delas dependente de outra(s). Porém, mais do que isso, deve-se atentar para as interrelações que regem seu comportamento. Segundo Meadows et al. [24], a análise das causas do crescimento e do comportamento de um sistema torna-se muito difícil quando há muitas quantidades diferentes (representadas nas variáveis de um modelo) variando simultaneamente.

A utilização da Técnica de Dinâmica de Sistemas possibilita compreender e representar o comportamento dinâmico de sistemas complexos. Mais do que isso, reconhece-se que a estrutura de um sistema, com suas numerosas relações circulares, interligadas e até retardadas, pode ser tão determinante na evolução de seu comportamento quanto a influência de cada componente em separado.

Além disso, a evolução dos sistemas é caracterizada por relações lineares e não lineares entre as variáveis, o que não têm sido convenientemente representado nos modelos adotados. Em um modelo linear, um incremento em uma variável leva a um incremento proporcional em outra variável dependente desta, sendo que a não linearidade leva a mudanças que não seguem um comportamento tão simplificado. A suposição de linearidade, portanto, leva à desconsideração do verdadeiro relacionamento entre as variáveis de um sistema, o que torna-se menos verdadeiro na medida em que se deseja visualizar um horizonte de médio e longo prazos, nos quais as não linearidades são mais dominantes.

Como a mente humana não é capaz de visualizar os efeitos das interrelações mesmo de um sistema real, pode-se utilizar modelos baseados em Dinâmica de Sistemas, que incorporam a estrutura não-linear destes sistemas (ou ao menos uma parte dela) e que buscam representar as variáveis e seus laços de conexão de uma forma mais facilitada para um observador.

Sendo assim, serão vistos neste capítulo as bases para a compreensão da Técnica de Dinâmica de Sistemas e um modelo proposto e, no capítulo a seguir, um estudo de aplicação em um sistema representado por este modelo.

4.2 - Dinâmica de Sistemas

4.2.1 - Histórico da Dinâmica de Sistemas

A base da modelagem de sistemas dinâmicos está calcada nos trabalhos de Jay W. Forrester que publicou, em 1961, o texto *Dinâmica Industrial*, apresentando uma nova disciplina para a simulação de sistemas. O principal objetivo neste trabalho foi o de englobar os aspectos relativos a flutuações na produção e na mão-de-obra em uma empresa manufatureira. Seguindo a mesma abordagem, Jay W. Forrester estendeu o trabalho ao nível da *Dinâmica Urbana* (1969) e *Dinâmica do Mundo* (1971), que envolvia questões econômicas, demográficas, urbanas e outros fatores característicos de um sistema sócio-econômico.

A partir da década de 70, esta abordagem se estendeu a outros campos do conhecimento: macro e microeconomia, planejamento e execução de políticas, gerenciamento de empresas, controle ambiental, disseminação de doenças etc.

4.2.2 - Elementos da Dinâmica de Sistemas

Os sistemas complexos possuem um grande número de variáveis, representativas de diversas características, e um conjunto de interrelações, muitas vezes de difícil percepção, que regem a sua evolução. A realimentação de informações entre estas variáveis gera a dinâmica do sistema e, portanto, necessita ser modelada para um eficaz processo de planejamento (ou, conforme o caso, de gerenciamento, de controle etc.).

Dentro do processo de realimentação podem ocorrer fenômenos que interferem no comportamento do sistema durante o decorrer do tempo (ou no decorrer da simulação, para modelos), sendo que a Dinâmica de Sistemas permite tratá-los adequadamente. Os fenômenos relevantes, seguindo a caracterização dada em Dyner et al. [7], constituem-se nos atrasos, nas distorções e nas respostas do sistema.

Os atrasos representam o tempo que é necessário para realizar uma ação desde que se buscam as informações pertinentes, incluído o tempo para a tomada de decisão.

As distorções podem surgir devido às diferenças de informação a cada estágio do ciclo de realimentação ou por causa da execução das ações. Erros na obtenção de dados, por exemplo, podem levar a distorções no resultado final. Outro ponto que deve ser levado em conta é a subjetividade do planejador, que pode resultar em interpretações ou análises que são função de sua própria experiência.

Finalmente, as respostas do sistema às informações frequentemente conduzem a uma expectativa de ampliações no ciclos de instabilidade. Supondo um caso real, isto pode causar excessiva demanda e esgotamento de recursos por parte de uma empresa ou mesmo de todo um sistema.

4.2.3 - Aplicação da Dinâmica de Sistemas

Como foi visto no capítulo anterior, conforme o tipo de estudo a ser feito e os seus objetivos, isto é, longo ou curto prazo, maior ou menor precisão, sistema de grande ou pequeno porte, ou outros enfoques, deve-se dispor de um modelo adequado que dê bons resultados e que apresente baixo custo (por exemplo, computacional) e facilidade de compreensão.

Conforme exposto em Dyner et al. [7], a crise energética configurada em racionamentos de energia elétrica e em déficits econômicos do setor energético na Colômbia tem mostrado a necessidade de construir modelos que permitam estudar cenários sob diferentes políticas governamentais. A Dinâmica de Sistemas pode contribuir, como demonstrado em seu trabalho, no processo de tomada de decisões no que se refere à substituição de eletricidade por gás e na substituição e conservação de energia elétrica em termos gerais.

Segundo o mesmo autor, nos Estados Unidos, o departamento de energia utiliza a Dinâmica de Sistemas para o planejamento do setor (Office of Energy Markets and End Use, US, 1991).

4.3 - Estrutura da modelagem da dinâmica de sistemas

Como já comentado, a dinâmica de sistemas permite tratar as interrelações presentes em um conjunto de variáveis de um sistema. A possibilidade de se visualizar os laços que unem estas variáveis torna o processo de compreensão do sistema mais facilitado, tanto pelo planejador como por um simples observador.

Nesse sentido, dispõe-se de duas estruturas básicas de apresentação de um modelo dinâmico. Estas estruturas, os diagramas causais (causal-loop diagrams) e os diagramas de fluxo (flow diagrams), permitem analisar de uma maneira qualitativa e quantitativa o comportamento do modelo, conforme será visto a seguir. Conhecendo-se estas estruturas e seus componentes (descritas em Mohapatra et al. [25]), poderá se passar, após, às fases de construção de um modelo.

4.3.1 - Diagramas causais

Estes diagramas apresentam as variáveis de um sistema e as interrelações entre elas de uma maneira qualitativa. Pode-se representar o sentido de influência de cada variável e o tipo de realimentação de um laço, ou seja, se é do tipo que tende a equilibrá-lo ou se é do tipo que tende a reforçar a evolução do comportamento das variáveis.

Um diagrama causal típico apresenta os elementos mostrados na Figura 4.3-1.

Através do diagrama causal, pode-se indicar, por exemplo, a evolução positiva de uma variável a partir da evolução positiva de uma anterior através do sinal que indica variação na mesma direção.

Para determinar se em um laço o comportamento inicial de uma variável será reforçado, pode-se proceder de duas formas:

- conta-se o número de sinais “-” no laço. Se o número é par ou zero, o comportamento tende a ser reforçado (tendência de reforço); se é ímpar, tende a sofrer influência no sentido oposto ao seu comportamento inicial (tendência de equilíbrio);
- supõe-se um comportamento inicial (por exemplo, uma elevação de seu valor). A partir daí, projeta-se o comportamento da variável seguinte, de acordo com o sinal “+” ou “-”, até se chegar novamente à variável sob análise. Se o comportamento for igual ao projetado inicialmente, há um reforço; caso contrário, há uma influência contrária ao comportamento inicialmente projetado.

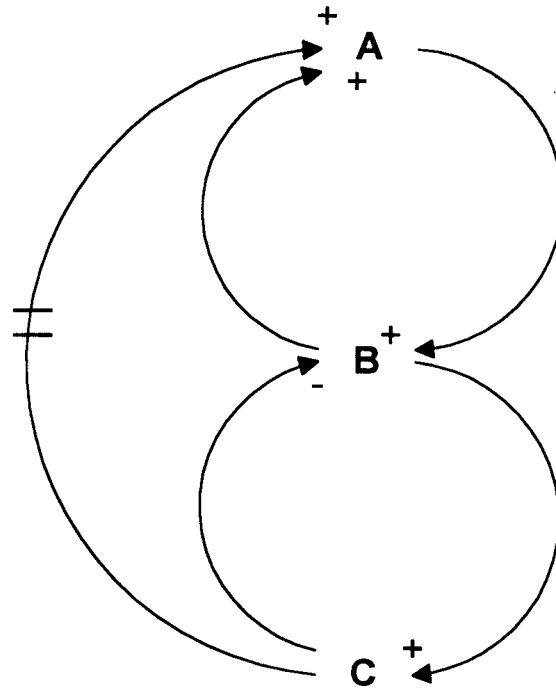


Figura 4.3-1 - Exemplo de diagrama causal

sendo:

A, B e C - variáveis de um sistema qualquer

→ - sinal de influência de uma variável em outra

⇨ - sinal de influência de uma variável em outra com atraso

+ - sinal que indica mudança na mesma direção

- - sinal que indica mudança na direção oposta

Obviamente que, para a construção de um modelo, estas indicações serão extraídas através da percepção que se tem do mundo real, mais precisamente do sistema que se deseja estudar.

4.3.2 - Diagramas de fluxo

Buscando-se a representação quantitativa em um modelo de dinâmica de sistemas, pode-se construir um diagrama de fluxo. Neste tipo de diagrama, são definidas as relações matemáticas entre as variáveis do sistema, relações estas que estão qualitativamente representadas no diagrama causal.

Os elementos utilizados em um diagrama de fluxo estão definidos nas seções seguintes.

4.3.3 - Fluxos físicos

Fluxos físicos representam a idéia de quantidades sendo transportadas entre pontos do sistema onde exista acumulação. Os fluxos físicos estão relacionados a fluxo de materiais, ocorrendo acumulações em função das taxas de entrada e/ou de saída destes materiais em uma variável de nível (onde ocorre a acumulação). Nos sistemas físicos, fluxos físicos seguem as leis da natureza, enquanto que em sistemas sócio-econômicos, seguem as diretrizes políticas de controle e gerenciamento.

É importante notar que estes fluxos são conservativos. Deste modo, quando um fluxo deixa uma variável de nível e é inserido em outra, a quantidade armazenada no primeiro nível é reduzida do mesmo valor com que é aumentada no segundo, sendo que a quantidade total do sistema permanece a mesma. Deve-se perceber, no entanto, que a fonte ou destino do fluxo pode estar fora deste mesmo sistema. Nesse caso, este ponto é representado por uma figura que não tem significado físico no sistema em estudo.

4.3.4 - Fluxos de informação

Os fluxos de informação extraem uma informação de uma constante ou variável auxiliar e a inserem em uma variável de taxa ou auxiliar. Além disso, fazem o elo de conexão entre fluxos físicos.

4.3.5 - Variáveis de nível

Estas variáveis representam acumulações que ocorrem no sistema. A cada passo da simulação há adição de um fluxo de entrada e subtração do correspondente fluxo de saída, tendo como base a quantidade que se dispunha no início do processo. Isto significa que esta

variável tem “memória”, isto é, guarda as informações relativas aos passos anteriores de um instante qualquer.

4.3.6 - Variáveis de fluxo

Estas variáveis, como o próprio nome diz, são utilizadas para controlar o fluxo, sendo que podem ser compostas por variáveis de nível, auxiliares ou mesmo constantes.

As variáveis de fluxo representam somas que ocorrem em pontos discretos de tempo no período analisado. Podem seguir as leis da natureza, quando se representa um sistema físico, ou decisões políticas ou de gerenciamento, quando se representa um sistema sócio-econômico.

4.3.7 - Variáveis auxiliares

Frequentemente as variáveis de fluxo são complicadas funções das variáveis de nível. Portanto, pode-se dividi-las em variáveis auxiliares, por facilidade de expressão. Estas variáveis, ao contrário das variáveis de nível, não guardam as informações referentes aos passos anteriores da simulação, mas apresentam resultados de cada instante específico.

4.3.8 - Constantes

São parâmetros que não variam com o passar do tempo. Ademais, devem ter significado no sistema real.

4.3.9 - Simbologia utilizada

Assim como um diagrama causal, o diagrama de fluxo dispõe de um conjunto de símbolos característicos da dinâmica de sistemas, os quais representam os elementos descritos nos itens anteriores. A simbologia adotada neste trabalho segue aquela adotada no Manual do Powersim [31]. Um diagrama de fluxo simplificado pode ser visto na Figura 4.3-2 a seguir.

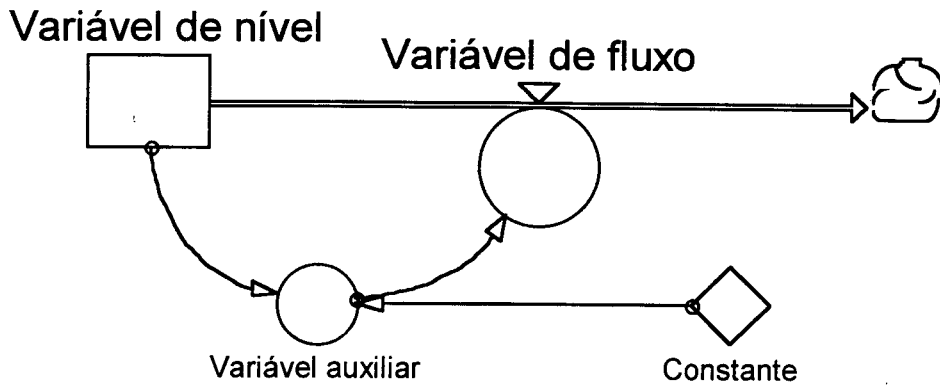


Figura 4.3-2 - Exemplo de diagrama de fluxo

Outros símbolos podem ser utilizados, dependendo da função que exercem no modelo. Uma variável auxiliar, por exemplo, pode ser representada da seguinte forma:

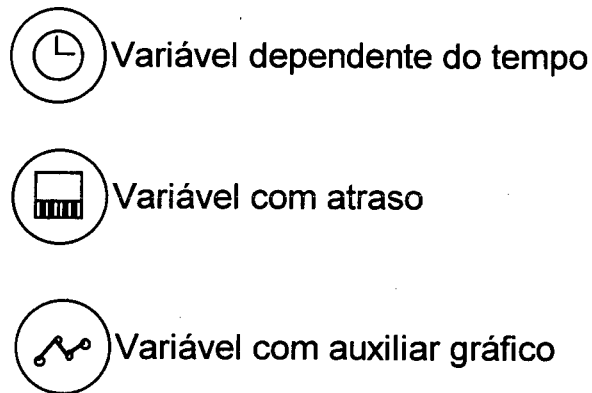


Figura 4.3-3 - Exemplos de outras variáveis auxiliares

Deve-se esclarecer que, no exemplo da Figura 4.3-2, a saída do fluxo físico não necessita ser analisada e, portanto, não é inserida em outra variável de nível e sim em um ponto externo ao modelo (representado por uma nuvem). Com isso, fica garantido o equilíbrio de quantidades, ou seja, a mesma quantidade que é extraída de um ponto deve ser inserida em outro.

Conforme a complexidade do modelo, alguns outros elementos podem ser adotados, os quais são utilizados para representar funções mais elaboradas e/ou formas alternativas de

simulação, porém não fazem parte do objetivo deste trabalho. Sendo assim, maiores informações a respeito podem ser obtidos em Mohapatra et al. [25] e Manual do Powersim [31].

4.4 - Características da modelagem

A construção do modelo é um processo que engloba desde a identificação da forma como é representada cada variável do sistema até o fechamento dos laços de interconexão entre elas, quando existirem. Além disso, o processo de validação do modelo também é importante pois o ajuste dos parâmetros depende da análise de sensibilidade que se faz com o modelo. Inicialmente deve-se ter em mente que a necessidade de modelagem por Dinâmica de Sistemas depende do reconhecimento, no sistema real, dos laços de interconexão entre um conjunto de variáveis que por outra forma de modelagem não estariam sendo bem representados.

Este tipo de modelagem obedece a uma série de princípios que regem a construção de modelos de dinâmica de sistemas.

Para ter uma característica dinâmica, um modelo deve conter, ao menos, uma variável de nível e uma de fluxo, compondo um laço de interconexão. Este laço contém, então, um fluxo físico e um de informação. Assim, uma informação determina uma ação que, por sua vez, influencia na nova decisão.

Outra característica importante diz respeito à situação das variáveis em relação ao tempo. Como foi definido anteriormente, as variáveis de nível contém quantidades acumuladas, ao passo que as outras variáveis apresentam valores instantâneos. Isto significa que, caso a simulação seja parada, as únicas variáveis que armazenarão seus valores serão as de nível. Dessa forma, os valores destas variáveis são suficientes para se conhecer o estado do sistema.

Deve-se notar também que, em função da característica de disposição apenas instantânea de valores nas variáveis de fluxo, e como estas variáveis não apresentam estados do sistema, nenhuma informação pode ser retirada delas para efeito de decisão. Assim, não é possível conectar uma variável de fluxo a outra do mesmo tipo, pois a sua variável de entrada é uma informação.

4.5 - Estudo de caso

Como foi visto neste capítulo até o momento, a existência de laços de interrelação entre variáveis de um sistema pode ser tratada, em um modelo, através da Dinâmica de Sistemas. Tendo-se incluído aí o planejamento de sistemas de energia elétrica, partiu-se para o estudo de um de seus componentes, sendo o estudo da projeção da demanda de energia.

Mais especificamente, definiu-se o mercado do setor residencial como alvo do estudo. Inicialmente, devido ao fato de que a desagregação por classe de consumo permite visualizar de modo mais claro as reações somente desta classe frente às variações do sistema. Além disso, o envolvimento das demais classes de consumo acarretaria a análise de um espectro bem maior de variáveis, perdendo-se a característica de simplicidade do modelo, o que fugiria ao objetivo deste trabalho.

Sendo assim, apresenta-se algumas características básicas do setor residencial brasileiro e, a seguir, o tratamento para a construção dos diagramas causais e de fluxo, este último sendo o modelo.

Após, são realizadas as simulações para a validação do modelo e para a construção dos cenários, analisando-se os resultados obtidos.

4.6 - Mercado residencial de energia elétrica - aspectos gerais

A evolução da demanda tem características específicas para cada setor, seja ele residencial, comercial, industrial (grandes consumidores e demais segmentos industriais) e outros (setor rural, de serviços públicos, iluminação pública etc.) sendo que os mais significativos são, em termos de consumo de energia elétrica, o industrial e o residencial. Esta situação é ilustrada na Figura 4.6-1.

Apesar de que o setor industrial absorve quase a metade do consumo total de energia, no que se refere ao comportamento de sua carga verifica-se uma evolução de uma maneira relativamente uniforme, não apresentando significativas e inesperadas variações.

Em se tratando do setor residencial, o consumo gira em torno de 24%. Além do fato de que é um número considerável, deve-se levar em conta que a sua evolução depende de padrões comportamentais que, por sua vez, estão sujeitos às condições econômicas e sociais (migrações, hábitos de consumo etc.) no longo prazo e aos efeitos sazonais ou até de grandes eventos, no curto prazo.

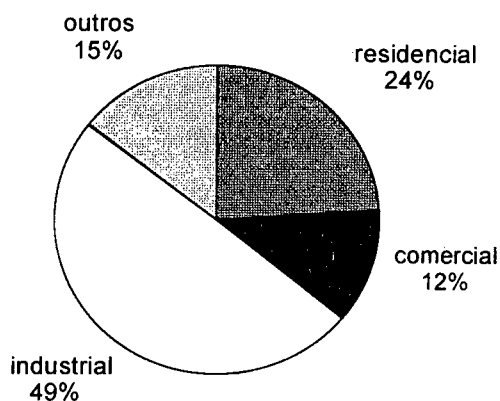


Figura 4.6-1 - Estrutura do mercado de energia

Somando a estes fatores a influência que existe sobre o consumo do setor comercial e uma fração de outros segmentos, tem-se uma parcela de mercado de mais de 40% sujeita às imprecisões futuras de consumo, tanto no que se refere à energia total consumida como à distribuição do consumo durante o ano.

Em vista destes fatos, o mercado residencial de energia elétrica será o objetivo estudado para a aplicação da técnica de modelagem por Dinâmica de Sistemas.

4.7 - Construção dos diagramas causais da demanda residencial de energia elétrica

De acordo com os princípios expostos na descrição da Dinâmica de Sistemas, buscou-se a representação do sistema em estudo através, inicialmente, da identificação de suas variáveis relevantes.

Neste estágio, encontra-se similaridade com outras técnicas, pois esta identificação recai sobre as mesmas variáveis, que são aquelas que regem, de uma maneira geral, o comportamento das variáveis dependentes.

A identificação das variáveis relevantes para o estudo é um dos pontos básicos para a construção do modelo. Optou-se por seguir as mesmas diretrizes adotadas pela Eletrobrás, no Plano 2015 [12], pois as variáveis aí definidas são as que se configuram como independentes no modelo, devendo-se notar que esta independência está condicionada as suas fronteiras. Caso se deseje um modelo mais complexo (seja através da construção de um novo ou da interligação deste com algum outro módulo), as variáveis ora

independentes poderão estar sujeitas à ação de outras variáveis, na condição de simples dependência ou pela possibilidade de pertencer a um laço de interconexão.

Sendo assim, as variáveis determinantes no modelo são o PIB (Produto Interno Bruto) e a População, além da Tarifa, que é utilizada para a adoção de políticas.

Com a População já é possível estabelecer algumas relações simplificadas de causalidade. Veja-se, por exemplo, a figura abaixo:

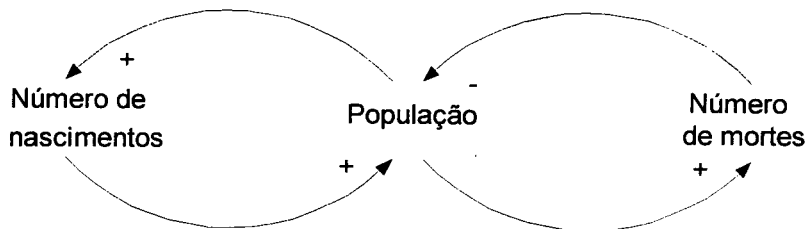


Figura 4.7-1 - Interrelacionamentos da variável “População”

Verifica-se, no segundo laço, que há uma tendência de equilíbrio, ao contrário do que ocorre no primeiro. Ou seja, o número de mortes tende a fazer com que diminua a população, ao mesmo tempo em que, quanto maior o número de pessoas, obviamente maior será o número de mortes. Por analogia, porém em sentido oposto, verifica-se que uma população maior levará a um maior número de nascimentos, aumentando o número do conjunto da população.

Em relação ao PIB, não é possível estabelecer uma causalidade, pois as influências existentes estão além da fronteira do modelo (poderia-se analisar, por exemplo, a situação econômica mundial, o que foge ao objetivo deste trabalho). Portanto, esta variável aparecerá como dependente apenas de sua própria taxa de crescimento.

No que se refere ao interrelacionamento entre energia e PIB, em Faria e Pinheiro (Ver discussão específica sobre elasticidades em Faria e Pinheiro [15]) mostra-se que o interrelacionamento entre estas variáveis existe, porém o crescimento do valor de uma não implica necessariamente a mesma variação para a outra (contrariando uma análise sob uma ótica fenomenológica simples, segundo a qual poderia se supor que um maior crescimento econômico induziria a um maior uso de energia).

Porém, no caso do consumidor residencial, a variação no consumo se reflete através do número de conexões de domicílios, assim como pela evolução da capacidade instalada em termos de eletrodomésticos, o que é bastante influenciado pela situação econômica. Decisões governamentais influem no consumo de energia elétrica de forma direta e indireta. De forma direta quando se consideram medidas relativas a tarifas, por exemplo, e de forma indireta através de decisões econômicas a nível de país, que se refletem no comportamento dos consumidores. Como estas situações tendem a estar cada vez mais presentes em função da abertura do sistema de energia elétrica, levando as empresas ao papel de decisoras até um determinado nível, estabeleceu-se uma hipótese mais próxima na relação energia-PIB.

O passo seguinte é a identificação dos elos que unem estas variáveis básicas às intermediárias para, a seguir, conectá-las à variável final, neste caso, “Consumo” (Consumo de energia elétrica).

Percebeu-se, neste ponto, um sentido unidirecional na influência entre variáveis, como pode-se verificar na Figura 4.7-2.

Isto decorre do fato de que as interrelações se concentram nas variáveis que têm relação direta com a variável final, o consumo, aliado ao fato de que as variáveis principais sofrem influências exógenas ao modelo, como já definido.

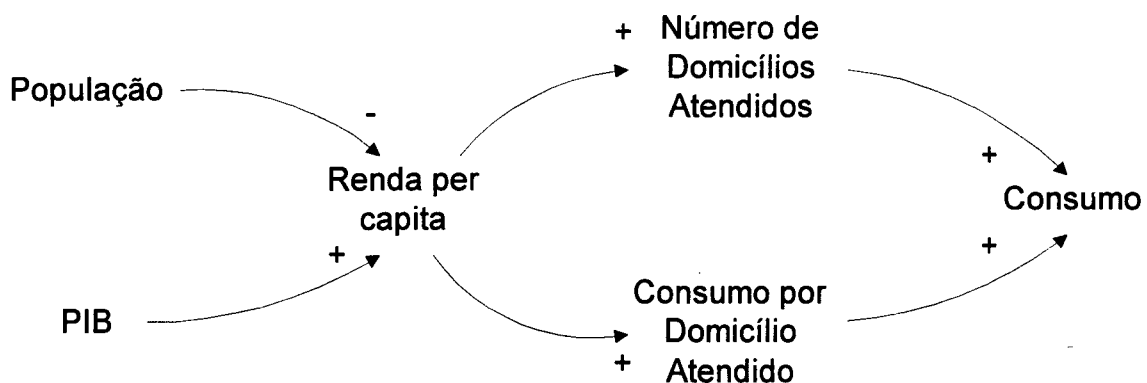


Figura 4.7-2 - Interrelacionamento unidirecional

Analisando-se, agora, a relação consumo-tarifa de energia (Figura 4.7-3), verifica-se que o consumo sofre a influência da tarifa através de dois laços, um de reforço e um de equilíbrio. No primeiro laço, o aumento do consumo aumenta as necessidades energéticas, o

que faz com que haja um incremento no uso da capacidade instalada. Isto tende a diminuir os custos totais o que, em última análise, ocasiona uma redução na tarifa. Esta redução, por sua vez, reforça o aumento que havia no consumo.

No caso do laço externo, o mesmo aumento no consumo descrito acima provoca o aumento da necessidade de investimentos no setor elétrico que se transformarão em investimentos a menos de possíveis restrições financeiras. Com isso, haverá aumento da capacidade instalada, o que elevará os custos totais e a tarifa, levando a uma tendência de retração do consumo.

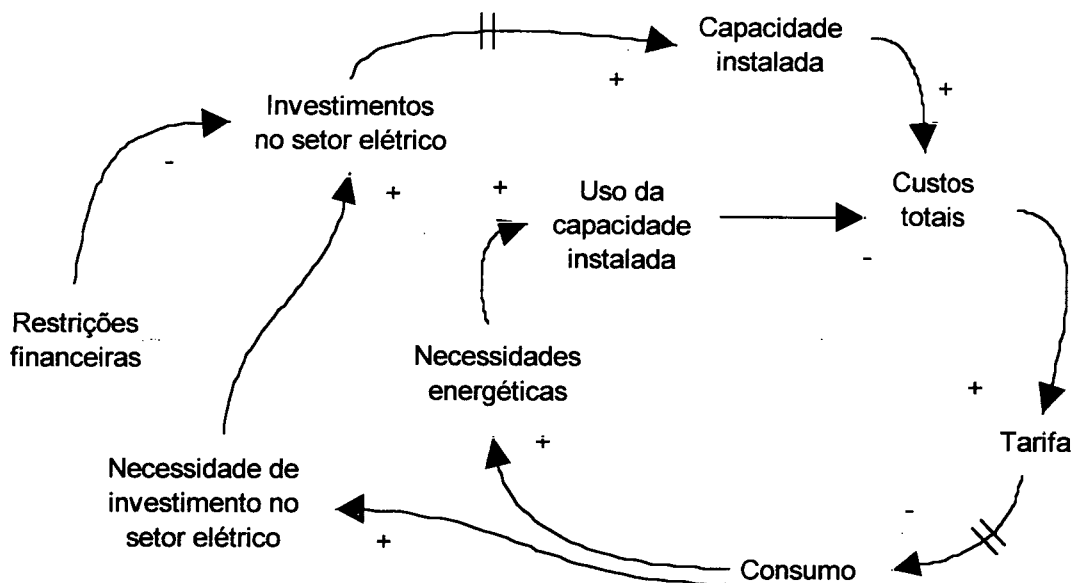


Figura 4.7-3 - Relação consumo-tarifa

Observa-se que o aumento do consumo tende a impulsionar a expansão da geração. Assim, haverá um aumento na capacidade de geração (construção de uma usina, por exemplo) o que, em uma análise simplificada, acarretará o aumento de tarifas (sabe-se que, atualmente, as tarifas são subsidiadas, porém, já se supõe a possibilidade de se trabalhar com preços de energia elétrica mais realistas). Com isso, o consumo tenderá a ser reduzido. Esta redução acontecerá após um determinado período, ou seja, existe um atraso entre a evolução da tarifa e do consumo.

Uma outra relação entre variáveis pesquisada por este autor diz respeito à conservação de energia. Os estudos nesta área são relativamente recentes e, mesmo na bibliografia, não se dispõe de dados concretos e definitivos em relação a números históricos e/ou projeções. Mesmo assim, como a conservação é um tópico cada vez mais presente nos estudos da área, incluiu-se um módulo que representa, de maneira simplificada, as consequências da conservação de energia elétrica no consumo final.

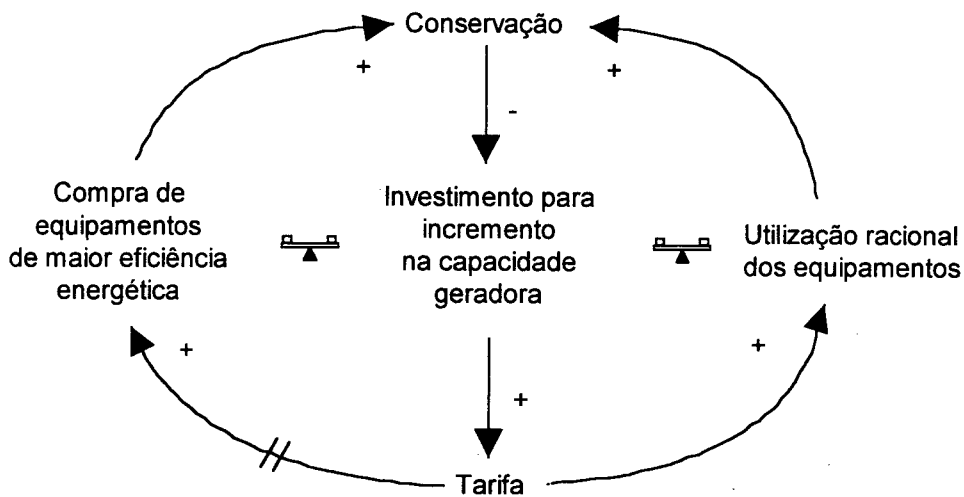


Figura 4.7-4 - Relação conservação-consumo

Como pode-se verificar no diagrama da Figura 4.7-4, a tarifa também pode ser utilizada como instrumento de aumento da necessidade de conservação e consequente redução de consumo. Esta hipótese foi adotada neste trabalho segundo o mesmo raciocínio descrito anteriormente, qual seja, o de se diminuir gradualmente os subsídios à tarifa de energia elétrica.

Fazendo a composição de todos os módulos mostrados, mais as variáveis intermediárias, pode-se visualizar o diagrama causal do sistema representado, o qual apresenta a visão qualitativa do sistema. No desenho, as setas indicam o sentido da influência e o sinal “+” ou “-” a tendência de aumento ou redução da variável influenciada. Veja-se, então, a Figura 4.7-5, mostrada a seguir:

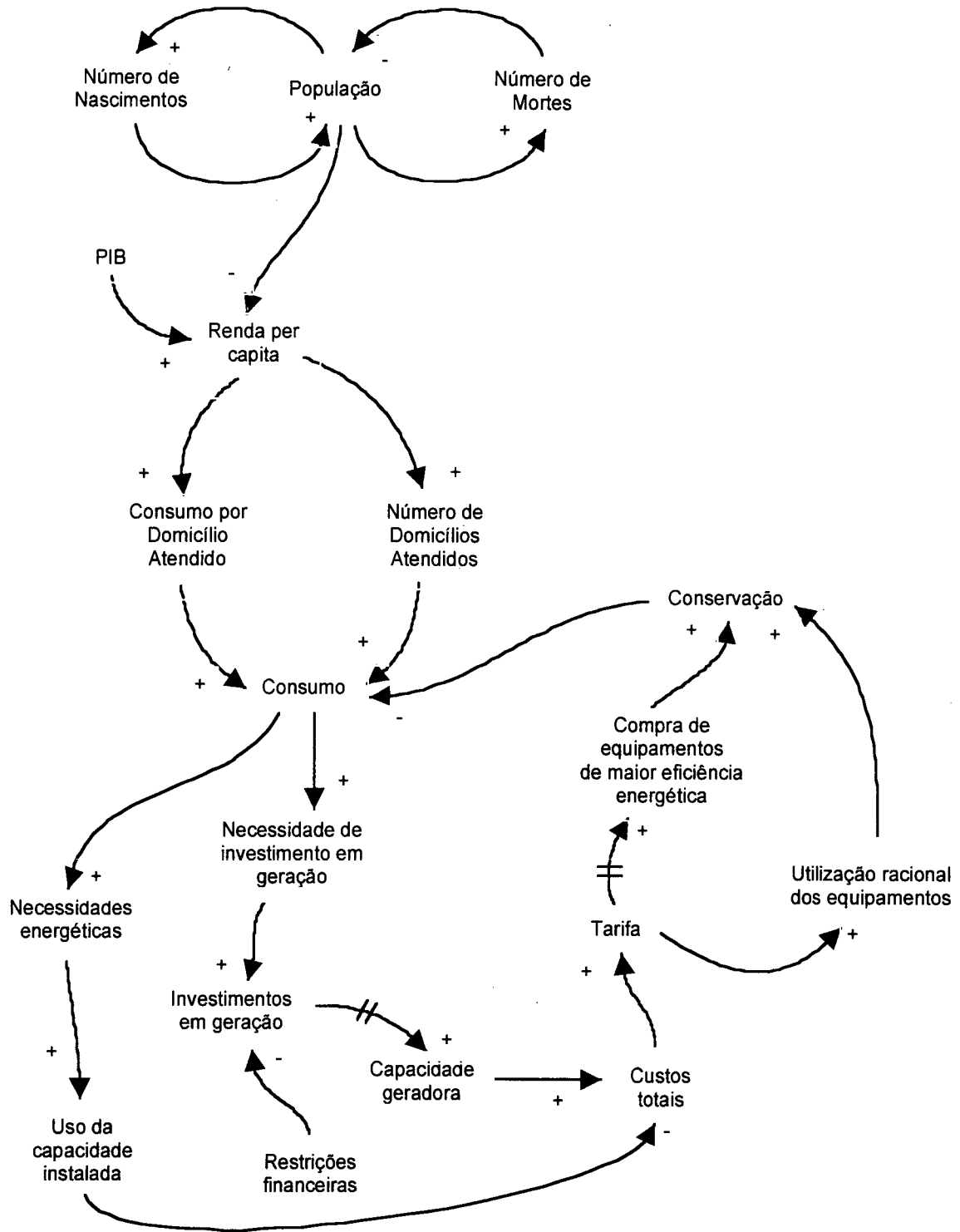


Figura 4.7-5 - Diagrama causal do sistema representado

A partir deste momento, passa-se a quantificar as variáveis descritas e a representá-las nos diagramas de fluxo, mostrados na seção seguinte.

4.8 - Construção dos diagramas de fluxo da demanda residencial de energia elétrica

4.8.1 - Construção dos diagramas básicos e seu equacionamento

Inicialmente, foram desenvolvidos os módulos individualmente, ou seja, definiram-se as relações entre as variáveis com base nos diagramas causais e, a seguir, foram ajustados os parâmetros de suas equações, até que se atingissem os valores históricos. Como o modelo não contém todas as variáveis que compõem o sistema real, foi necessário reproduzir os dados históricos somente com as variáveis presentes no modelo. Com isso, foram realizadas simulações e ajustes até serem reproduzidas as séries históricas com uma aproximação satisfatória. A descrição detalhada das variáveis e do equacionamento pode ser encontrada no Anexo I.

Nos itens a seguir, são apresentadas as definições das variáveis. Na primeira linha tem-se o significado da legenda. No que se refere às equações, aquelas que contém a expressão “dt” correspondem às variáveis que possuem fluxos entrando e/ou saindo.

4.8.1.1 - Módulo do PIB

Este módulo contém a variável básica com o valor inicial do PIB, ligada à taxa de crescimento do PIB, o qual sofre influência de AP (auxiliar do PIB) e da variável PAPIB (que será usada para a construção de cenários). A figura em forma de relógio em TAP significa que a variável está definida também em função do tempo.

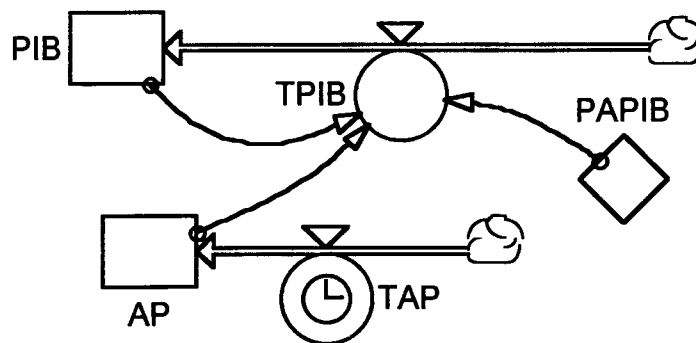


Figura 4.8-1 - Módulo do PIB

PIB: Produto Interno Bruto [US\$]

Valor inicial: $120,6 \cdot 10^9$

Equação: $+dt \cdot TPIB$

AP: Auxiliar do PIB

Valor inicial: 1

Equação: $+dt \cdot TAP$

TPIB: Taxa de crescimento-do PIB

Equação: $PIB \cdot 15.3\% / AP \cdot PAPIB$

TAP: Variável para auxílio na reprodução dos dados históricos do PIB.

Equação: $TIME / 1986 / 3$

PAPIB: Política de ajuste do PIB

Valor: Variável conforme cenário

A variável AP foi utilizada como um meio de auxiliar na reprodução dos dados históricos, visto que a evolução do PIB é função de um conjunto de variáveis que necessitariam de complexo tratamento (por exemplo, sob um enfoque macroeconômico), o que não faz parte do escopo deste trabalho. Da mesma forma, os ajustes nas equações (com a inclusão de parâmetros) foram determinados de forma a se reproduzir os dados históricos com as variáveis presentes no modelo e com um mínimo erro. Outros módulos também apresentam estes artifícios de cálculo para a representação dos dados históricos, como pode ser visto nas respectivas descrições.

4.8.1.2 - Módulo da População

A variável PΑPOP, que representa uma política de incentivo ao aumento ou redução do número de pessoas (por exemplo, campanhas de saúde, controle de natalidade etc.), tem a função de auxiliar na construção de cenários demográficos. Como simplificação, está associada somente à variável NN (Número de Nascimentos), sem que isto prejudique os resultados do trabalho.

As taxas de natalidade e de mortalidade foram adotadas de tal modo a serem reproduzidos os dados históricos.

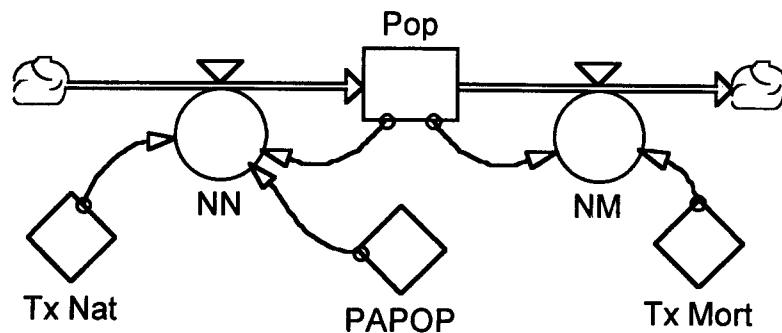


Figura 4.8-2 - Módulo da População

Pop: Número de habitantes do Brasil

Valor inicial: $93,1 \cdot 10^6$

Equação: $-dt \cdot NM$

$+dt \cdot NN$

NM: Número de Mortes

Equação: $Pop \cdot TxMort$

NN: Número de nascimentos

Equação: $Pop \cdot TxNat \cdot PAPOP$

TxMort: Taxa de mortalidade

Valor inicial: 1.07%

TxNat: Taxa de natalidade

Valor inicial: 3.3%

PAPOP: Política de ajuste da POP

Valor: Variável conforme cenário

4.8.1.3 - Módulo do NDA

O número de domicílios atendidos é calculado com base nas equações a seguir relacionadas, devendo-se notar que foi necessário incluir uma variável auxiliar para o cálculo da Taxa de Atendimento devido a impossibilidade de serem reproduzidos os dados históricos somente com as demais variáveis. Além disso, o cálculo do número de habitantes por domicílio obedece a um equacionamento dependente do tempo e da renda per capita, resultando na equação mostrada.

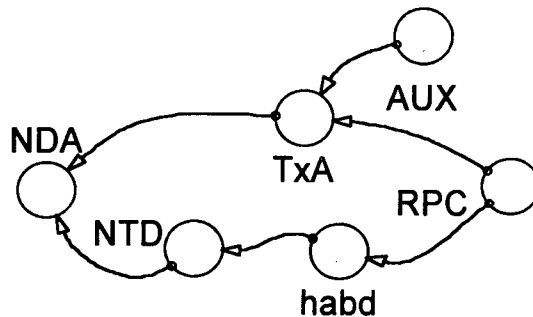


Figura 4.8-3 - Módulo do NDA

NDA: Número de domicílios atendidos

Equação: $NTD * TxA / 100$

NTD: Número total de domicílios.

Equação: $Pop / habd$

RPC: Renda per capita

Equação: PIB / Pop

AUX: Variável para auxílio na reprodução dos dados históricos da Taxa de Atendimento

Equação: $EXP(TIME/10) / 4.1e85$

habd: Número de habitantes por domicílio.

Equação: $197000 / (0.005 * TIME)^{3.95} - EXP(100 / RPC) * 0.5 - 17.9$

4.8.1.4 - Módulo do CDA

Para o cálculo do consumo por domicílio atendido, fez-se uso de uma ferramenta gráfica auxiliar encontrada no software utilizado (Powersim [31]), resultando nas séries de dados mostradas nas definições das variáveis CDA e Tarifa. Neste módulo aparece o fenômeno do “atraso”, entre as variáveis RcA e RPC. Isto significa que a renda per capita influencia o consumo por domicílio atendido somente após algum tempo (este tempo é função do valor definido em At1). Para a quantificação deste atraso, fez-se a suposição de um ano no horizonte de estudo, pois não se dispunha de valores reais, devido ao fato de que considerações relativas a atrasos não têm sido usualmente tratadas nas previsões de mercado.

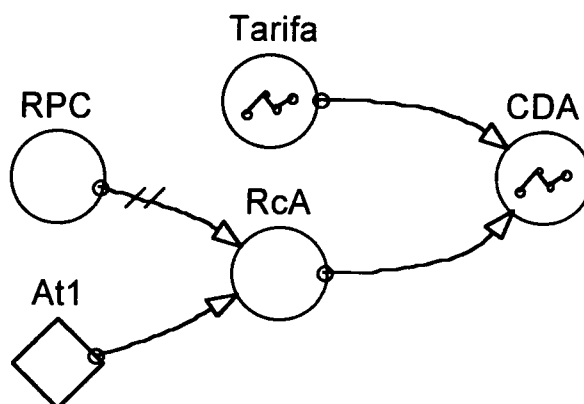


Figura 4.8-4 - Módulo do CDA

CDA: Consumo por domicílio atendido [KWh]

Equação: $286 * (RcA / Tarifa) / GRAPH(TIME, 1900, 10, [0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 1, 3.6, 6.5, 9.1, 11.7 \text{ "Min:0.8;Max:13"}])$

Tarifa: Tarifa [US\$]

Equação: $(dI/dC) * 0.0004 * GRAPH(dC, 1900, 10, [0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.04, 1.55, 1.86, 2.07, 2.21 \text{ "Min:0.01;Max:2.5"}]) * PAT$

RcA: RPC com atraso

Equação: $DELAYINF(RPC, At1, 1, 1232)$

RPC: Renda per capita

Equação: PIB/Pop

At1: Tempo representativo do atraso entre variações da RPC e CDA (em unidades de tempo de simulação).

Valor 1

4.8.1.5 - Módulo da Conservação

A conservação é uma taxa constante de conservação de energia (ao longo do tempo) em relação ao consumo de energia elétrica. Novamente aqui utiliza-se a função de atraso, o que significa que variações na tarifa somente influenciarão a conservação depois de um certo tempo (função de At2). Este tempo foi suposto como igual a um ano, pelas mesmas razões expostas na descrição do Módulo do CDA.

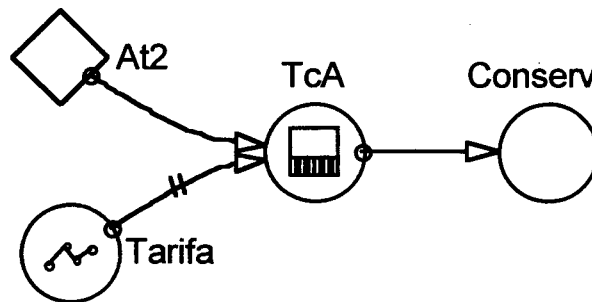


Figura 4.8-5 - Módulo da Conservação

Conserv: Conservação de energia elétrica

Equação: $1/3 * TcA * Consumo / 10^3$

TcA: Corresponde à Tarifa porém com um atraso.

Equação: $DELAYINF(Tarifa, At2, 1, 1)$

At2: Tempo representativo do atraso entre variações da Tarifa e Conservação (em unidades de tempo de simulação).

Valor: 1

4.8.1.6 - Módulo da Tarifa

Para o cálculo da tarifa utilizou-se uma definição em função dos custos totais para a geração e transporte de energia elétrica ao consumidor final, porém de uma forma

simplificada, de modo que se pudesse realizar estes cálculos com as variáveis disponíveis no modelo.

Basicamente, definiu-se que a tarifa é a razão entre uma fração do PIB (representando um investimento) e uma fração do Consumo (representando, por hipótese, o acréscimo de energia disponível no sistema). Para efeito de ajuste aos dados históricos, foi novamente utilizada a função gráfica do software Powersim [31], chegando-se na série histórica.

Está incluída a variável PAT para que possam ser construídos cenários com a definição de políticas, inferidas através da variação dos seus valores.

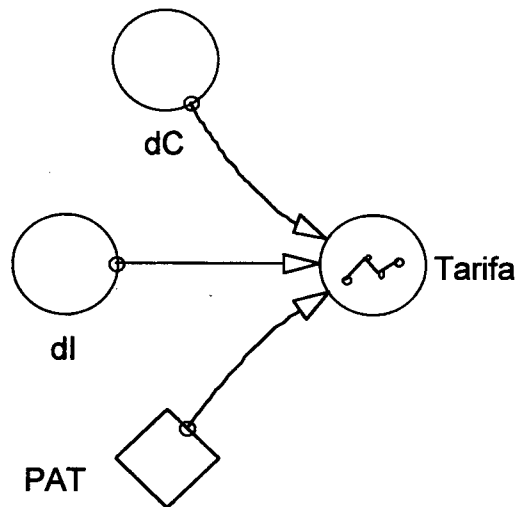


Figura 4.8-6 - Módulo da Tarifa

Tarifa: Tarifa (US\$/MWh)

Equação: $(dI/dC) * 0.000192 * \text{GRAPH}(dC, 1900, 10, [0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.04, 1.55, 1.86, 2.07, 2.21] \text{Min:} 0.01; \text{Max:} 2.5) * PAT$

dC: Acréscimo na oferta de energia (média por ano) equivalente ao próprio consumo (MWh)

Valor: Consumo

dI: Custo (em US\$) do acréscimo anual de energia, equivalente a 1.4% do PIB.

Equação: $PIB * 1.4\%$

PAT: Política de Ajuste de Tarifas

Valor: Variável conforme cenário

4.8.2 - Construção do diagrama completo

Tendo-se definidas as variáveis de cada módulo em separado, pode-se neste momento compô-los em um só conjunto, o que resulta no modelo mostrado na Figura 4.8-7.

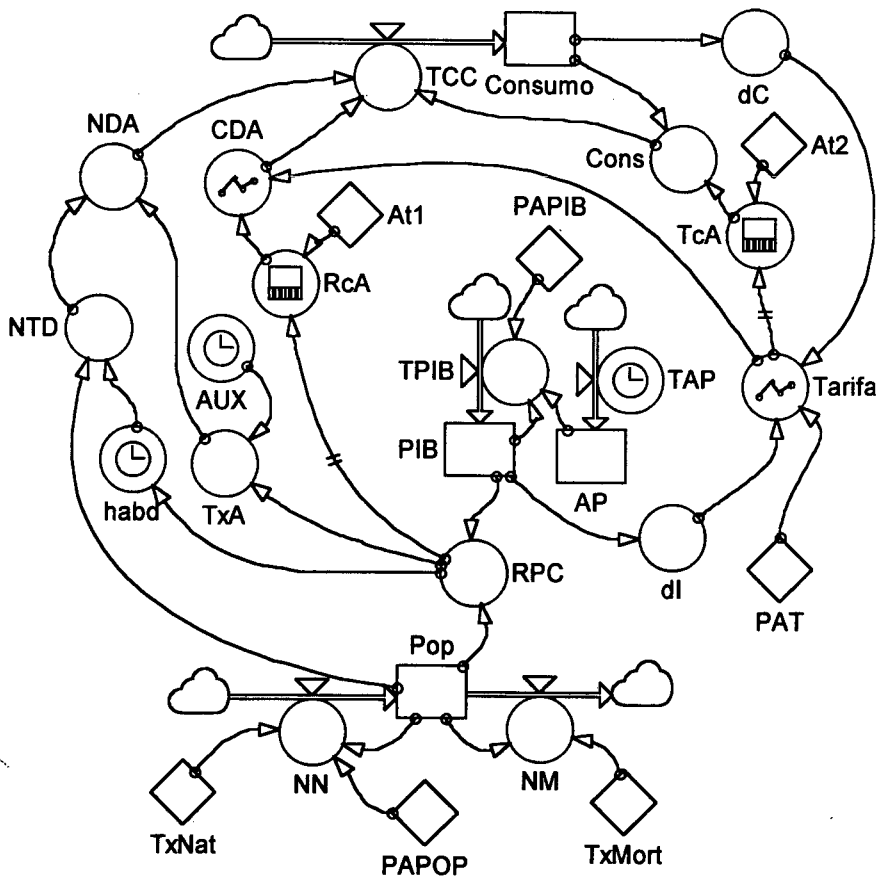


Figura 4.8-7 - Modelo para projeção da demanda de energia elétrica

Como o modelo não dispõe de um módulo de geração, o aumento da capacidade geradora está representado por uma fração do consumo, de modo que seja possível calcular um valor aproximado para a tarifa, como definido na Seção 4.8.1.6. Esta informação é então, novamente inserida no cálculo do aumento do consumo.

O ajuste dos parâmetros de todas as variáveis foi realizado por meio de testes de simulação, comparando os valores de saída do modelo com os da Eletrobrás [9], de modo que houvesse concordância entre eles.

4.9 - Validação do modelo

Segundo Mohapatra et al. [25], “na modelagem tradicional, como na econométrica, a validação dos modelos é feita através de testes estatísticos das equações. Se cada equação é estatisticamente validada, normalmente se assume que o comportamento previsto pelo modelo é confiável. No caso da dinâmica de sistemas, os modelos são julgados pela sua utilidade em servir aos objetivos para os quais são designados”. Desse modo, o ajuste do equacionamento matemático depende, além dos dados dos quais se possa dispor, também da intuição e subjetividade oriundos da experiência que o construtor do modelo tem sobre o estudo do sistema.

Para se realizar comparações entre o comportamento do sistema que o modelo produz e séries históricas de dados, utilizaram-se os dados da Eletrobrás [9].

Para se chegar a valores aceitáveis, foi necessário todo um trabalhoso processo de ajuste dos parâmetros internos do modelo. Devido à existência dos laços de conexão entre diversas variáveis, cada ajuste feito influenciava, em maior ou menor grau, o comportamento de outras variáveis.

Necessitou-se, portanto, de uma quantidade razoável de simulações, mudanças nos parâmetros e novas simulações, até que se chegasse a uma reprodução do histórico de dados com uma fidelidade compatível com a simplicidade do modelo.

Como resultado das simulações, obtiveram-se os seguintes valores para as variáveis PIB, Pop. e Consumo:

Tabela 4.9-1 - Resultados da simulação do modelo

Tempo (ano)	PIB (10 ⁹ US\$)	Pop (10 ⁶ hab.)	Consumo (GWh)
1970	120,60	93,10	8407,00
1971	139,05	95,18	9147,50
1972	155,04	97,30	9937,30
1973	169,32	99,47	10846,30
1974	182,32	101,69	11868,78
1975	194,32	103,95	13003,88
1976	205,52	106,27	14253,37
1977	216,05	108,64	15620,74
1978	226,01	111,06	17110,65
1979	235,49	113,54	18728,73
1980	244,54	116,07	20481,47
1981	253,21	118,66	22376,16
1982	261,55	121,31	24430,00
1983	269,59	124,01	26653,52
1984	277,35	126,78	29058,41
1985	284,87	129,61	31657,66
1986	292,16	132,50	34465,73
1987	299,24	135,45	37498,84
1988	306,14	138,47	40775,19
1989	312,85	141,56	44315,32
1990	319,40	144,72	48142,55

Tabela 4.9-2 - Comparação da evolução do PIB entre resultado do modelo e série histórica

Tempo (ano)	PIB - modelo (10 ⁹ US\$)	PIB - SH (10 ⁹ US\$)	Diferença (%)
1970	120,60	120,60	0,00
1971	139,05	134,20	3,62
1972	155,04	150,20	3,22
1973	169,32	171,20	-1,10
1974	182,32	185,20	-1,56
1975	194,32	194,90	-0,30
1976	205,52	215,00	-4,41
1977	216,05	225,50	-4,19
1978	226,01	236,80	-4,55
1979	235,49	252,90	-6,88
1980	244,54	276,30	-11,50
1981	253,21	264,10	-4,12
1982	261,55	265,70	-1,56
1983	269,59	256,70	5,02
1984	277,35	270,30	2,61
1985	284,87	291,90	-2,41
1986	292,16	313,80	-6,90
1987	299,24	325,80	-8,15
1988	306,14	324,80	-5,75
1989	312,85	335,20	-6,67
1990	319,40	320,00	-0,19

Verificou-se a similaridade dos resultados através das diferenças percentuais entre os dados de referência e os valores do modelo. Para o PIB, obteve-se o resultado mostrado na Tabela 4.9-2.

Ou, na forma de gráfico:

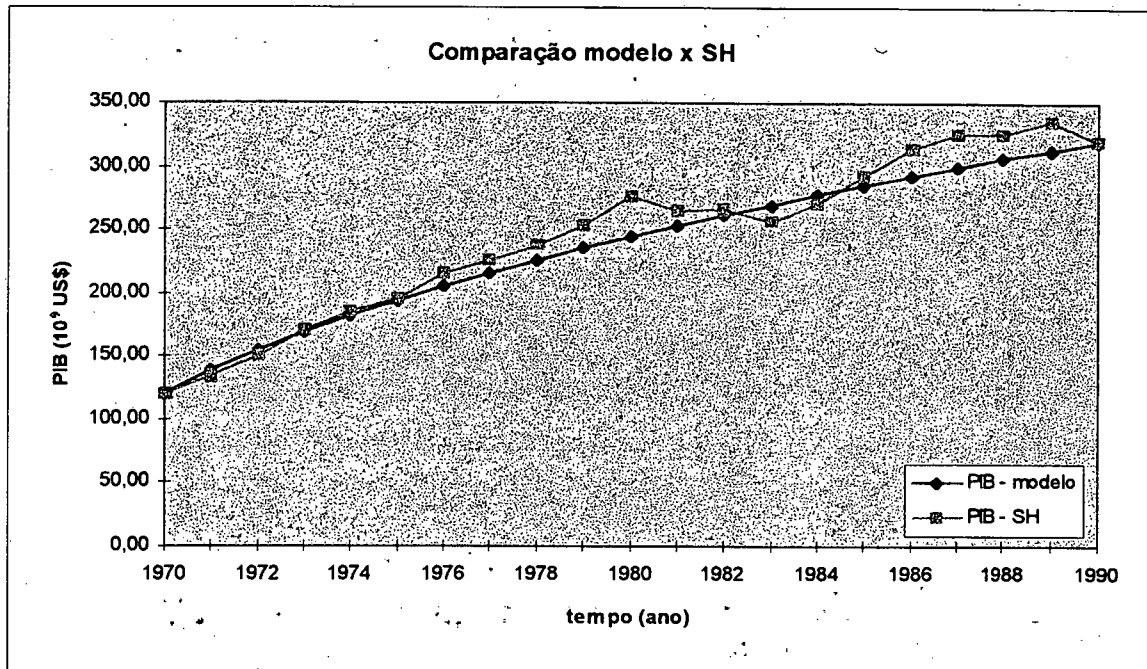


Gráfico 4.9-1 - Comparação da evolução do PIB entre resultado do modelo e série histórica

E, para a População e o Consumo, obtiveram-se os resultados mostrados nas Tabelas 4.9-3 e 4.9-4, respectivamente.

Tabela 4.9-3 - Comparação da evolução da população entre resultado do modelo e série histórica

Tempo (ano)	Pop. - modelo (10 ⁶ hab.)	Pop. - SH (10 ⁶ hab.)	Diferença (%)
1970	93,10	93,14	-0,04
1971	95,18		
1972	97,30		
1973	99,47		
1974	101,69		
1975	103,95	107,15	-2,98
1976	106,27		
1977	108,64		
1978	111,06		
1979	113,54		
1980	116,07	119,00	-2,46
1981	118,66		
1982	121,31		
1983	124,01		
1984	126,78		
1985	129,61	131,98	-1,80
1986	132,50		
1987	135,45		
1988	138,47		
1989	141,56		
1990	144,72	144,72	0,00

Tabela 4.9-4 - Comparação da evolução do consumo de energia elétrica entre resultado do modelo e série histórica

Tempo (ano)	Cons. - modelo (GWh)	Cons. - SH (GWh)	Diferença (%)
1970	8407	8407	0,00
1971	9147	9139	0,09
1972	9937	9849	0,90
1973	10846	10919	-0,67
1974	11869	11998	-1,08
1975	13004	13208	-1,55
1976	14253	14842	-3,97
1977	15621	17122	-8,77
1978	17111	19787	-13,53
1979	18729	21098	-11,23
1980	20481	23277	-12,01
1981	22376	25060	-10,71
1982	24430	27078	-9,78
1983	26654	29747	-10,40
1984	29058	30948	-6,11
1985	31658	32670	-3,10
1986	34466	35780	-3,67
1987	37499	38407	-2,36
1988	40775	40564	0,52
1989	44315	46718	-5,14
1990	48143	48050	0,19

Visualizando-se as curvas destes dados, tem-se o Gráfico 4.9-2:

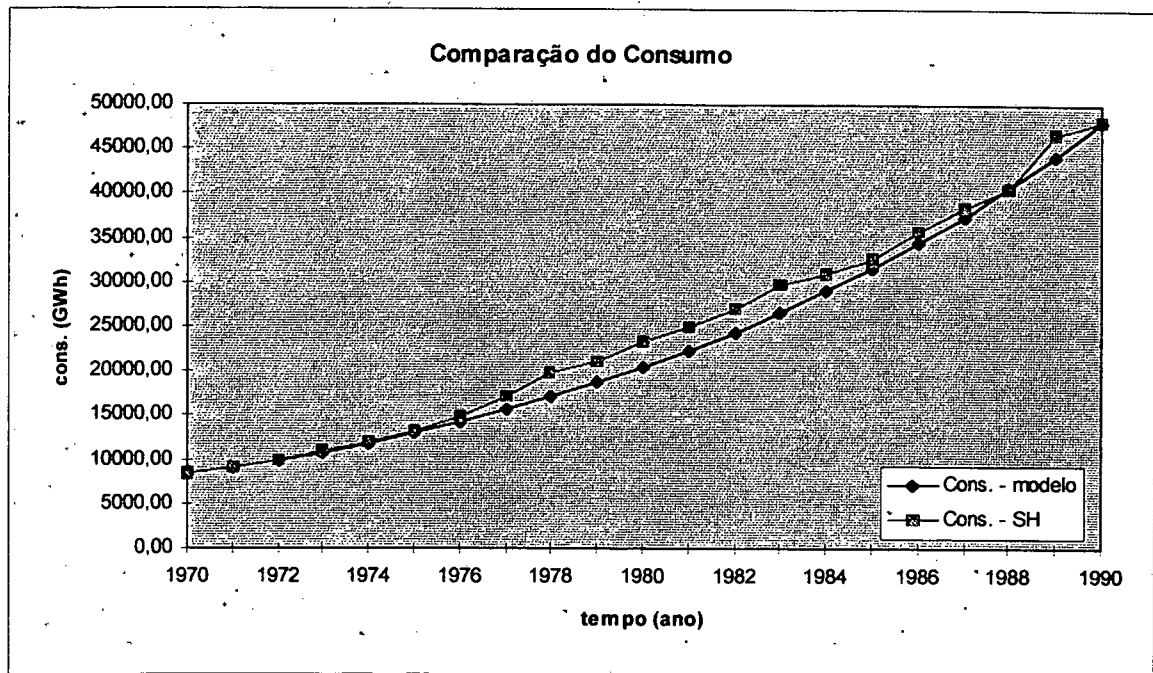


Gráfico 4.9-2 - Comparação da evolução do Consumo de energia elétrica entre resultado do modelo e série histórica

Nota-se que, enquanto as diferenças para a População são bastante pequenas e estáveis, ocorrem valores maiores para as variáveis PIB e Consumo. Isto se deve mais às irregularidades dos dados reais do que à própria modelagem, como pode-se comprovar pelos gráficos 4.9-1 e 4.9-2.

Nos dois casos, está bastante visível que há uma similaridade de curvas. Mesmo para variáveis intermediárias, quando havia maior diferença percentual, obteve-se uma reprodução de comportamento aceitável. Portanto, pode-se dizer que o modelo está reproduzindo as séries históricas com a precisão suficiente para o estudo desejado, visto que, mais do que se comparar valores, o que se pretende é analisar estas tendências de evolução do comportamento.

4.10 - Conclusão

Neste capítulo, foram abordadas algumas características dos sistemas reais, tendo-se visto que a realimentação existente entre muitas de suas variáveis exerce influência considerável sobre o resultado da sua evolução.

Verificou-se também que a realimentação contém elementos que modificam o comportamento do sistema, destacando-se o atraso na influência de uma variável sobre outra. Em um processo de coleta de informações, tomada de decisões e de ações e resultado efetivo, pode-se ter um intervalo de tempo que não estaria sendo considerado através de técnicas tradicionais de planejamento.

Para fins de planejamento de sistemas de energia elétrica, portanto, as técnicas de dinâmica de sistemas oferecem bons resultados quando se levam em conta as mudanças que ocorrem durante o decorrer do tempo e ainda pelo fato de que se pode substituir uma grande necessidade de informação pelo conhecimento que se tenha do sistema em estudo.

Este conhecimento se reflete na representatividade do modelo construído. Aliado a isso, os diagramas causais e de fluxo, que se destinam a representar o sistema, proporcionam uma visão facilitada e amigável não só das variáveis, mas principalmente das relações entre elas.

Foi visto também que a modelagem adotada segue um conjunto de princípios que garantem a característica dinâmica do modelo, notadamente no que se refere aos diagramas de fluxo. Assim, a existência de uma variável de estado e de um laço de realimentação proporciona ao sistema dispor de um ponto de estoque, no qual se acumulam quantidades, e de um caminho fechado pelo qual escoo o fluxo, configurando-se em um modelo com características dinâmicas.

Com o modelo proposto, serão criados cenários de demanda de energia elétrica, de forma a se estudar o comportamento do sistema, tanto em função da atuação das interrelações internas quanto da execução de políticas, o que será visto no próximo capítulo.

Capítulo 5 - APLICAÇÃO DO MODELO NA CONSTRUÇÃO DE CENÁRIOS

5.1 - Introdução

Tendo-se definidos os conceitos básicos da Dinâmica de Sistemas e desenvolvido-se um modelo, pode-se, então, construir cenários de demanda de energia elétrica. Os parâmetros utilizados são aqueles com os quais foi validado o modelo, conforme descrito no capítulo anterior.

Neste capítulo, através do ajuste das variáveis com as quais foram feitos os estudos para a validação, passa-se a projetar os cenários de acordo com determinadas premissas que caracterizam cada um destes cenários.

5.2 - Construção de cenários com dinâmica de sistemas

Como exemplificação do comportamento do modelo, foram inferidas políticas através da alteração nos valores das constantes PAT (Política de Ajuste de Tarifa), PAPOP (Política de Ajuste da População) e PAPIB (Política de Ajuste do PIB), analisando-se o comportamento do sistema e do resultado do consumo, em particular.

As alterações foram inseridas no sistema nos anos de 1990, 2000 e 2010, como simplificação da adoção de políticas em todo o horizonte de estudo (supondo-se que isto ocorre ano a ano).

Como premissas para a construção de cenários foram adotadas, basicamente, as do Plano 2015 da Eletrobrás. Assim, as simulações iniciais, que referem-se às variações isoladas de PAT, PAPOP e PAPIB, se destinaram a verificar a sua influência isolada no comportamento do sistema, ou seja, realizou-se uma análise de sensibilidade.

Para realizar as simulações, foram aplicados fatores de multiplicação em determinados anos, de modo a representar diretrizes ou políticas adotadas, estudando-se a reação do modelo. Os fatores utilizados para a Análise I foram os seguintes:

Tabela 5.2-1 - Fatores de multiplicação para a Análise I

Ano	PAPIB	PAPOP	PAT
1990	1,30	1,10	1,27
2000	3,30	1,10	1,98
2010	4,50	1,10	2,83

E para a Análise II:

Tabela 5.2-2 - Fatores de multiplicação para a Análise II

Ano	PAPIB	PAPOP	PAT
1990	3,00	0,90	1,70
2000	5,00	0,80	2,36
2010	5,30	0,70	3,06

Assim, utilizaram-se os valores da coluna de PAPIB da Tabela 5.2-1 para a simulação da evolução do comportamento do consumo em função da evolução do PIB para a Análise I. A seguir, utilizaram-se os valores da coluna de PAPIB da Tabela 5.2-2 para a simulação da evolução do comportamento do consumo em função da evolução do PIB para a Análise II. Para a simulação em função da evolução da População, utilizaram-se os valores das colunas de PAPOP das Tabelas 5.2-1 e 5.2-2 para as Análises I e II, respectivamente. O mesmo foi feito para as análises em função da evolução da Tarifa, utilizando-se as colunas de PAT das mesmas Tabelas.

Em cada análise isolada, estes fatores foram procurados de modo a se atingir os valores descritos no Plano 2015. Vale ressaltar que utilizaram-se os dados do Plano 2015 para que se tivesse uma referência para as simulações, embora não se pretenda reproduzir estes dados citados.

Antes de se começar a discutir os resultados das simulações, um aspecto importante a ser lembrado refere-se à interpretação dos resultados das tabelas apresentadas e a sua relação com as características do tipo de modelagem empregada. Os montantes, que são os

valores das variáveis ano a ano, influem no consumo não no sentido de aumentar ou diminuir a sua quantidade propriamente dita, mas na alteração de sua taxa de crescimento. Isto remete a discussão à teoria da Dinâmica de Sistemas, ou seja, deve-se sempre lembrar que está se tratando de uma variável que está sendo acumulada (através de um fluxo físico), a partir da qual (e de outras variáveis) retiram-se informações que influirão novamente em um determinado fluxo físico, que pode ser o mesmo (fechando um laço) ou algum outro do modelo.

5.2.1 - Alteração no comportamento do PIB

No Plano 2015, vemos que “a hipótese básica assumida, em todos os cenários do comportamento futuro da economia, é o de recuperação da trajetória de crescimento da economia brasileira”.

Desse modo, trabalhou-se no sentido de se alcançar, através do modelo, os valores correspondentes aos Cenários I e IV do Plano 2015 da Eletrobrás [9], respectivamente. Obteve-se, então, os valores mostrados nas Tabelas 5.2-3 e 5.2-4.

Tabela 5.2-3 - Análise I somente com alteração na evolução do PIB

Tempo (ano)	PIB - 1 ¹ (10 ⁹ US\$)	Pop. - 1 (10 ⁶ hab.)	RPC - 1 (US\$/hab)	Conserv - 1 (MWh)	Tarifa - 1 (US\$/MWh)	Consumo - 1 (GWh)
1990	319,40	144,72	2207,05	672,99	39,41	48142,55
1995	359,61	161,59	2225,49	757,27	29,34	72801,53
2000	396,97	180,43	2200,15	838,92	21,23	111057,24
2005	490,82	201,46	2436,27	1016,31	17,33	168279,93
2010	591,09	224,95	2627,65	1236,74	13,43	261498,05
2015	739,60	251,17	2944,55	1543,85	10,54	416951,92

¹ Os índices “1” correspondem à Análise I, de menor crescimento.

Tabela 5.2-4 - Análise II somente com alteração na evolução do PIB

Tempo (ano)	PIB - 2 ² (10 ⁹ US\$)	Pop. - 2 (10 ⁶ hab.)	RPC - 2 (US\$/hab)	Conserv - 2 (MWh)	Tarifa - 2 (US\$/MWh)	Consumo - 2 (GWh)
1990	319,40	144,72	2207,05	672,99	39,41	48142,55
1995	418,21	161,59	2588,11	858,61	33,87	73358,51
2000	523,82	180,43	2903,22	1078,89	27,98	111207,11
2005	720,01	201,46	3573,92	1458,64	25,62	166942,49
2010	951,74	224,95	4230,91	1952,88	21,99	257132,45
2015	1237,99	251,17	4928,81	2562,75	18,03	407799,14

Vale lembrar que, para se chegar nos valores destas tabelas, foram utilizados os fatores de multiplicação apresentados nas Tabelas 5.2-1 e 5.2-2, respectivamente. Desse modo, a Análise I é o resultado da aplicação dos fatores de multiplicação da coluna de PAPIB da Tabela 5.2-1, enquanto que a Análise II está ligada à coluna de PAPIB da Tabela 5.2-2. Nestas análises, os outros fatores de multiplicação não foram utilizados.

Pode-se ver que, apesar de a renda per capita ser maior na Análise II, em função do aumento do PIB, o consumo é um pouco menor, ao contrário do que se poderia esperar. Isto ocorre porque uma parcela do PIB é aplicada no setor elétrico, mais precisamente na expansão da geração. De acordo com a hipótese simplificadora adotada, aumentam-se os custos totais e, por conseguinte, a tarifa. Esta, por sua vez, exerce influência sobre o consumo através do consumo por domicílio atendido, que faz com que o seu crescimento seja reduzido. Ainda em função da tarifa, a conservação também tende a reduzir o consumo total.

² Os índices "2" correspondem à Análise II, de maior crescimento.

Tem-se uma melhor noção do resultado através do Gráfico 5.2-1, que mostra a comparação entre o consumo de cada análise em função da variação somente na evolução do PIB.

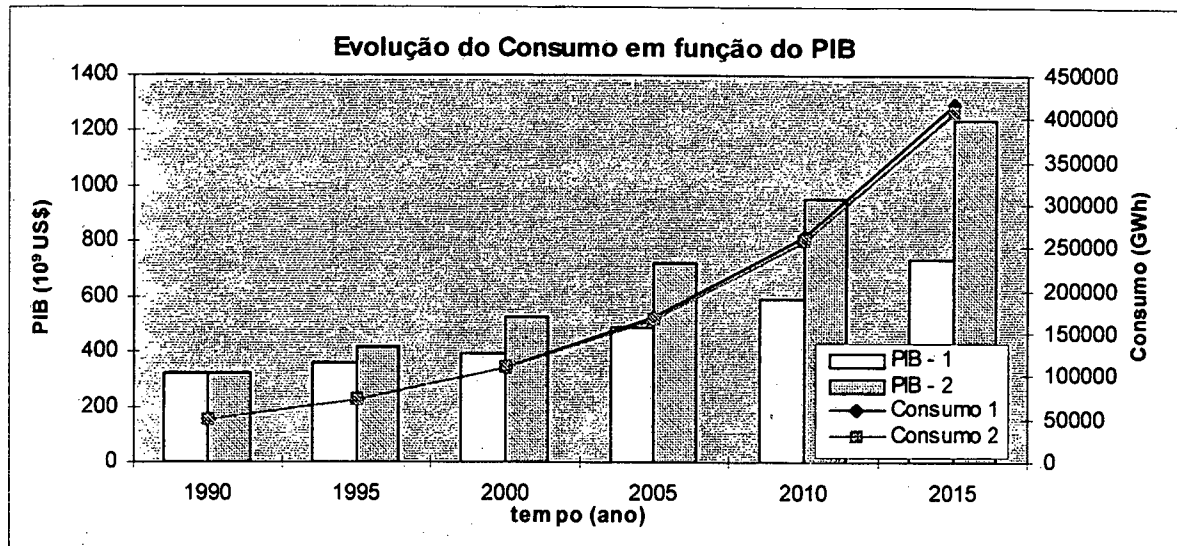


Gráfico 5.2-1 - Evolução do Consumo em função do PIB

5.2.2 - Alteração no comportamento da População

No caso da evolução dos números da população, o Plano 2015 prevê um único cenário demográfico. Mesmo assim, elaboraram-se algumas comparações no tocante ao crescimento populacional e sua influência nas variáveis do sistema. O resultado está mostrado nas Tabelas 5.2-5 e 5.2-6, a seguir:

Tabela 5.2-5 - Análise I somente com alteração na evolução da População

Tempo (ano)	PIB - 1 (10 ⁹ US\$)	Pop. - 1 (10 ⁶ hab.)	RPC - 1 (US\$/hab)	Conserv - 1 (MWh)	Tarifa - 1 (US\$/MWh)	Consumo - 1 (GWh)
1990	319,40	144,72	2207,05	672,99	39,41	48142,55
1995	349,99	159,00	2201,25	740,40	28,58	72742,72
2000	377,70	174,69	2162,16	801,67	20,24	110835,65
2005	403,17	188,84	2135,04	859,96	14,15	169255,56
2010	426,85	204,13	2091,04	916,88	9,55	265388,52
2015	449,04	217,11	2068,30	971,36	6,23	428112,94

e

Tabela 5.2-6 - Análise II somente com alteração na evolução da População

Tempo (ano)	PIB - 2 (10 ⁹ US\$)	Pop. - 2 (10 ⁶ hab.)	RPC - 2 (US\$/hab)	Conserv - 2 (MWh)	Tarifa - 2 (US\$/MWh)	Consumo - 2 (GWh)
1990	319,40	144,72	2207,05	672,99	39,41	48142,55
1995	349,99	164,21	2131,33	739,59	28,64	72594,04
2000	377,70	186,34	2026,98	802,12	20,40	109990,00
2005	403,17	211,44	1906,80	860,71	14,20	168627,37
2010	426,85	239,93	1779,09	917,77	9,55	265634,83
2015	449,04	272,25	1649,38	972,73	6,19	431268,49

A utilização dos fatores de multiplicação da População seguiu basicamente o mesmo procedimento aplicado para as análises em função do PIB. Para simular a evolução do consumo em função de um determinado aumento da População, utilizaram-se os valores da coluna de PAPOP da Tabela 5.2-2, resultando na Análise I. Supondo um aumento maior da População, utilizaram-se os valores da coluna de PAPOP da Tabela 5.2-1 (valores

numéricos maiores que os da mesma coluna da Tabela 5.2-2), resultando na Análise II (População maior). Novamente, os outros fatores não foram utilizados neste momento.

Obviamente que, aumentando o número de pessoas e permanecendo o mesmo crescimento do PIB, a renda per capita irá diminuir, diminuindo o consumo por domicílio atendido e, por consequência, o consumo total. Porém, pode-se ver pelo Gráfico 5.2-2 que, dentro dos cenários demográficos considerados, não há uma diferença razoável no consumo.

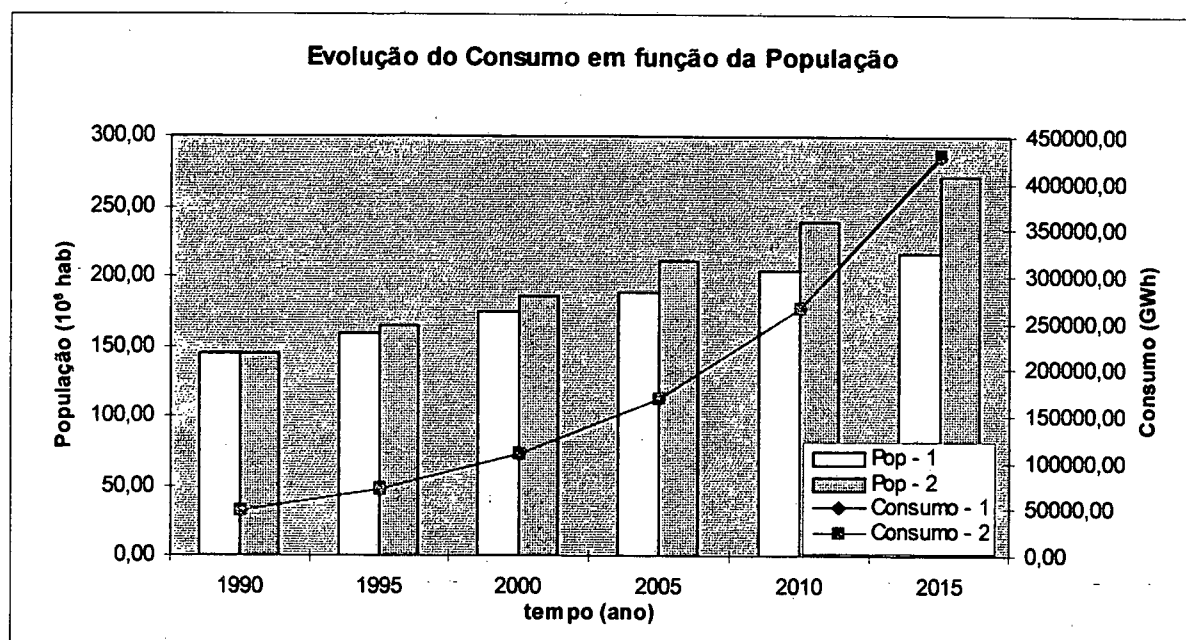


Gráfico 5.2-2 - Evolução do Consumo em função da População

Assim, mesmo um crescimento populacional com outras taxas, desde que em torno dos valores considerados na Análise I, devem levar a resultados bastante similares no que se refere à evolução do consumo.

5.2.3 - Alteração no comportamento da Tarifa (através da adoção de políticas)

Para o estudo das consequências das alterações na evolução da tarifa quando considerada em separado, utilizou-se o valor objetivo citado no Plano 2015, ou seja, de US\$ 67,00. Assim como nas duas análises anteriores, foram realizadas duas análises de sensibilidade (através da utilização dos fatores de multiplicação das Tabelas 5.2.1 e 5.2-2, respectivamente), sendo que, na primeira, definiu-se um valor objetivo hipotético de

US\$ 50,00, alterando-se diretamente o valor instantâneo da variável Tarifa. O objetivo é o de atingir um valor médio para a tarifa conforme os valores especificados em cada análise. Obtiveram-se os resultados mostrados nas Tabelas 5.2-7 e 5.2-8.

Tabela 5.2-7 - Análise I somente com diferenciação de política de tarifas

Tempo (ano)	RPC - 1 (US\$/hab)	Conserv - 1 (MWh)	Tarifa - 1 (US\$/MWh)	Consumo - 1 (GWh)
1990	2207,05	672,99	50,05	48142,55
1995	2165,95	923,98	39,55	66761,93
2000	2093,37	1000,97	50,12	93119,45
2005	2001,24	1712,09	43,40	114789,81
2010	1897,54	1820,44	50,03	143434,87
2015	1787,77	2583,82	44,14	171022,43

e

Tabela 5.2-8 - Análise II somente com diferenciação de política de tarifas

Tempo (ano)	RPC - 2 (US\$/hab)	Conserv - 2 (MWh)	Tarifa - 2 (US\$/MWh)	Consumo - 2 (GWh)
1990	2207,05	672,99	67,00	48142,55
1995	2165,95	1216,98	57,39	61583,11
2000	2093,37	1318,00	66,92	79122,52
2005	2001,24	1932,87	59,38	95184,00
2010	1897,54	2054,54	66,95	115889,71
2015	1787,77	2786,34	59,85	136389,06

Neste caso, a evolução da população e do PIB segue a mesma tendência que àquela até o ano de 1989, o que explica os mesmos valores de renda per capita.

A evolução da tarifa, no modelo, apresenta pontos de corte devido aos ajustes terem sido feitos, por simplicidade, somente nos anos de 1990, 2000 e 2010, aliado ao comportamento histórico de decréscimo dos seus valores.

Com a adoção de uma política de reajustes com intervalos menores, pode-se ter uma evolução mais bem comportada. Percebe-se, ainda assim, um crescimento médio nos valores das tarifas (nas duas análises), indicando que uma política de ajustes provocará, ao menos, uma estabilização dos valores a médio prazo, o que percebe-se no Gráfico 5.2-3, mostrado a seguir.

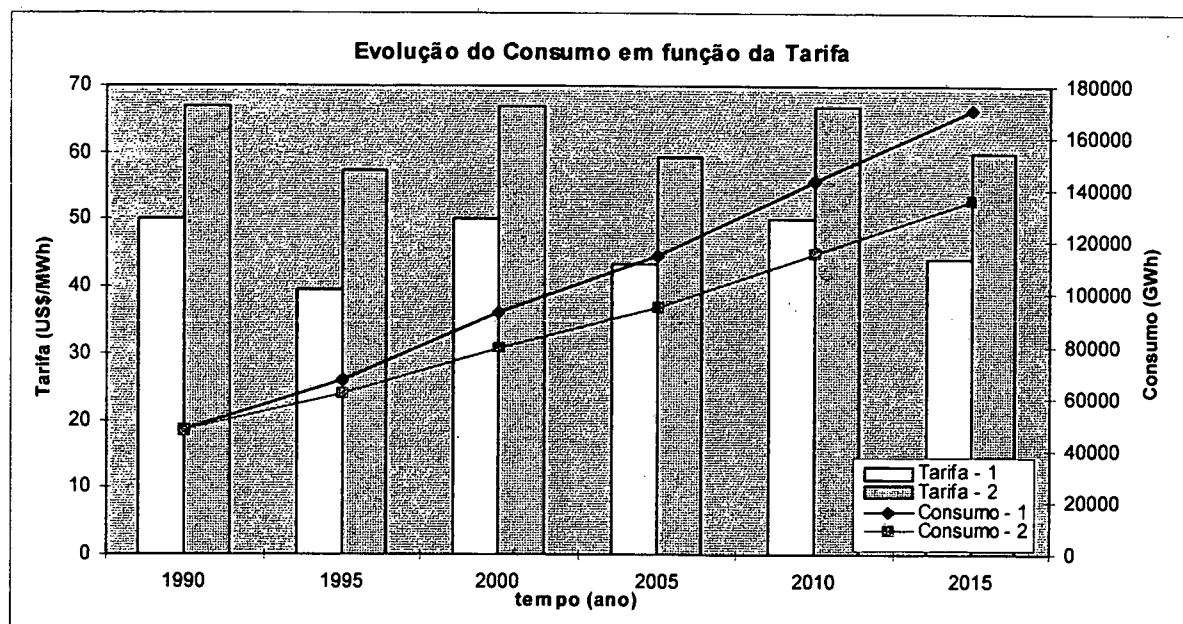


Gráfico 5.2-3 - Evolução do Consumo em função da Tarifa

No que se refere ao consumo, naturalmente que a aplicação de tarifas maiores leva a sua redução, além de um aumento nos valores de conservação de energia, em decorrência de equipamentos mais eficientes, por exemplo.

5.2.4 - Alteração conjunta de PAPIB e PAPOP

Antes de se estudar o comportamento do sistema frente a alterações com os três multiplicadores, simulou-se a sua evolução sem a existência de uma política de reajustes nas tarifas. Pretendeu-se verificar se as variáveis continuariam mantendo as mesmas tendências do início do horizonte de estudo.

Isto foi feito através da utilização conjunta dos fatores de multiplicação das Tabelas 5.2-1 para a Análise I e 5.2-2 para a Análise II.

De acordo com o exposto, as variáveis PIB, POP e RPC apresentarão o mesmo resultado em todas as análises mostradas deste ponto em diante, conforme relacionado nas Tabelas 5.2-9 e 5.2-10, mostradas a seguir.

Tabela 5.2-9 - Resultados fixos para a Análise I

Tempo	PIB (10 ⁹ US\$)	POP (10 ⁶ hab)	RPC (US\$/hab)
1990	319,40	144,72	2207,05
1995	359,61	164,21	2189,92
2000	396,97	186,34	2130,38
2005	490,82	211,44	2321,30
2010	591,09	239,93	2463,63
2015	739,60	272,25	2716,61

e

Tabela 5.2-10 - Resultados fixos para a Análise II

Tempo	PIB (10 ⁹ US\$)	POP (10 ⁶ hab)	RPC (US\$/hab)
1990	319,40	144,72	2207,05
1995	418,21	159,00	2630,29
2000	523,82	174,69	2998,62
2005	720,01	188,84	3812,87
2010	951,74	204,13	4662,35
2015	1237,99	217,11	5702,22

Com relação às demais variáveis, obteve-se:

Tabela 5.2-11 - Resultados para a Análise I (com alteração em PAPIB e PAPOP)

Tempo	CDA (KWh)	Conserv (MWh)	Tarifa (US\$/MWh)	Consumo (MWh)
1990	1762,38	672,99	39,41	48142,55
1995	2057,13	756,85	29,37	72726,35
2000	2462,46	839,15	21,29	110754,12
2005	3222,38	1016,60	17,35	168053,55
2010	4440,51	1237,13	13,43	261540,39
2015	6203,03	1544,37	10,52	417700,99

e.

Tabela 5.2-12 - Resultados para a Análise II (com alteração em PAPIB e PAPOP)

Tempo	CDA (KWh)	Conserv (MWh)	Tarifa (US\$/MWh)	Consumo (MWh)
1990	1762,38	672,99	39,41	48142,55
1995	2070,63	858,38	33,87	73358,43
2000	2555,72	1078,60	28,02	111058,83
2005	3466,38	1457,86	25,72	166329,14
2010	4960,00	1951,76	22,13	255473,02
2015	7362,12	2560,41	18,23	403484,62

Primeiramente, deve-se notar que, na Análise I tem-se um consumo maior que na Análise II, ao contrário do que se poderia esperar. Obviamente que, pela simplicidade do modelo, os valores podem ser discutidos. O que é mais importante, no entanto, é a tendência do consumo em não seguir o crescimento do PIB de forma acentuada. Os resultados indicam que, mesmo com um grande crescimento econômico, outras variáveis passarão a ter bastante influência na evolução do consumo. Veja-se que, apesar do aumento mais acentuado do consumo por domicílio atendido (CDA) na Análise II, a conservação (Conserv) também é maior, fruto da existência de níveis tarifários um pouco mais elevados (decorrentes inclusive do aumento do PIB), o que está mostrado nos Gráficos 5.2-4 e 5.2-5.

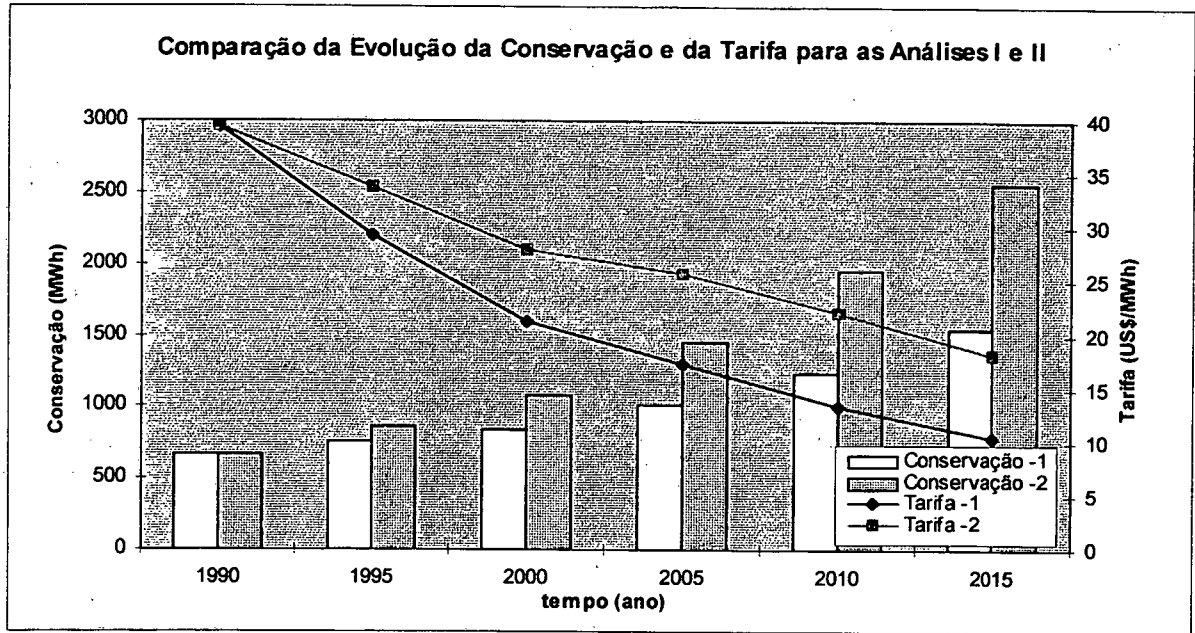


Gráfico 5.2-4 - Comparação da evolução da Conservação e da Tarifa para as Análises I e II

e

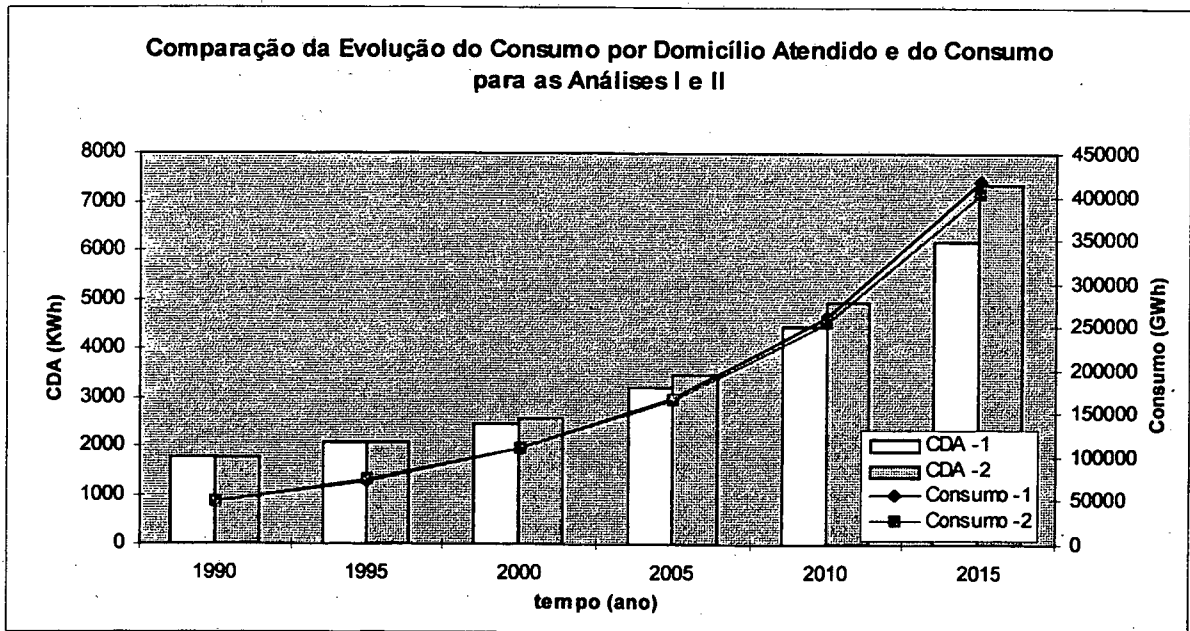


Gráfico 5.2-5 - Comparação da evolução do Consumo por Domicílio Atendido e do Consumo para as Análises I e II

No próximo item, a existência de uma política de tarifas passará a ser utilizada também como instrumento de construção de cenários.

5.3 - Construção de cenários de mercado de energia elétrica

Conhecendo-se o comportamento do sistema frente às alterações discutidas até o momento, realizaram-se simulações com mudanças simultâneas nas variáveis PAT, PAPOP e PAPIB.

Para o caso de PAPIB e PAPOP, estas mudanças representaram as perspectivas naturais de evolução do sistema, ou seja, o que se espera em relação ao futuro e que está além das fronteiras do modelo.

No que se refere à variável PAT, os ajustes significaram a adoção de políticas que tiveram o objetivo de interferir no comportamento do sistema, como numa situação real.

Todas estas alterações, portanto, têm por base algumas diretrizes que determinam o direcionamento, pelo menos inicial, da evolução das variáveis. Dessa forma, foram constituídos dois cenários de mercado, baseados nas seguintes premissas básicas mostradas na Tabela 5.3-1.

Tabela 5.3-1 - Premissas dos cenários de mercado

CENÁRIOS	PREMISSAS
Cenário I	<ul style="list-style-type: none"> • Retomada gradual do crescimento econômico • Crescimento populacional com taxa constante • Setor elétrico permanece estatal em sua maior parte • Não aplicação efetiva de política de ajuste de tarifas (valor objetivo médio: US\$ 50,00)
Cenário II	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento econômico acelerado • Maior controle do crescimento populacional • Setor elétrico é organizado de forma a se preparar para mudanças estruturais (estatal x privado) • Aplicação de política de ajustes de tarifas (valor objetivo médio: US\$ 67,00)

A definição das premissas seguiu as orientações comumente utilizadas. Para o primeiro cenário, a evolução de um quadro de crescimento econômico constante e sem maiores alterações na estrutura do sistema elétrico. No caso das tarifas, adotou-se a hipótese de se chegar a US\$ 50,00 como valor de tarifa (apenas se definiu um valor inferior ao do Cenário II para efeito de simulação).

Em contrapartida, tem-se uma expectativa de grande crescimento econômico no Cenário II, com o encaminhamento das políticas de modernização que vem sendo aplicadas. Isto se reflete nas diretrizes para o sistema elétrico, notadamente na elevação dos preços da tarifa conforme necessidades de mercado (este valor adotado teve como referência o Plano 2015).

Nas simulações sem alteração na política de tarifas, mostradas no item anterior, não se atingiu os valores objetivo de US\$ 50,00 e US\$ 67,00 para os Cenários I e II, respectivamente, definidos na Tabela 5.3-1. Passou-se, portanto, a aplicar os fatores de reajuste utilizados na análise com alteração isolada da tarifa. Obteve-se:

Tabela 5.3-2 - Resultados para o Cenário I (com alteração em todos os multiplicadores da Tabela 5.2-1)

Tempo	CDA (KWh)	Conserv (MWh)	Tarifa (US\$/MWh)	Consumo (MWh)
1990	1387,70	672,99	50,05	48142,55
1995	1487,90	944,95	40,61	66804,93
2000	997,33	1047,49	52,57	93303,00
2005	1055,56	2024,94	52,96	114502,92
2010	853,82	2457,23	69,82	142318,19
2015	885,54	4111,81	73,68	168755,70

Tabela 5.3-3 - Resultados para o Cenário II (com alteração em todos os multiplicadores da Tabela 5.2-2)

Tempo	CDA (KWh)	Conserv (MWh)	Tarifa (US\$/MWh)	Consumo (MWh)
1990	1036,69	672,99	67,00	48142,55
1995	1028,40	1409,85	68,19	61938,34
2000	773,96	1774,66	92,52	79372,34
2005	834,98	3283,54	106,76	94553,87
2010	722,71	4382,04	151,89	113905,74
2015	792,10	7362,06	169,41	132839,17

Neste caso, houve um exagerado aumento da tarifa, com consequência no consumo final. Isto ocorreu devido às alterações na dinâmica interna do comportamento do modelo. Nas duas tabelas anteriores, pode-se notar um crescimento médio da tarifa, o que exerce influência no sentido de aumentar a conservação e diminuir o consumo por domicílio atendido, causando diminuição nas taxas de crescimento do consumo e reduzindo as quantidades acumuladas ano a ano na própria variável Consumo.

Porém, os multiplicadores utilizados anteriormente para as tarifas, quando de sua análise isolada, tornaram-se muito expressivos no caso da análise conjunta. Isto acarretou grande aceleração na evolução do crescimento dos valores da tarifa e das demais variáveis do laço.

Como forma, então, de construir cenários com tarifas adequadas, decidiu-se intervir no sistema somente quando necessário, isto é, reajustando os valores da tarifa caso estivessem abaixo dos valores objetivo.

Para o Cenário I, foram realizadas três intervenções, assim como antes, porém com reajustes menores. Já no Cenário II, foram necessárias apenas duas intervenções, sendo que a segunda foi bastante pequena. Desse ponto em diante, o sistema manteve o valor da tarifa próximo ao valor objetivo de US\$ 67,00, denotando que, novamente, a dinâmica interna do modelo sofreu uma alteração que mudou a evolução do comportamento da tarifa. Os

resultados destas simulações, incluindo os multiplicadores atualizados, estão mostrados nas Tabelas 5.3-4, 5.3-5, 5.3-6 e 5.3-7.

Tabela 5.3-4 - Fatores de multiplicação da Tabela 5.2-1 atualizados para o Cenário I

Ano	PAPIB	PAPOP	PAT
1990	1,30	1,10	1,27
2000	3,30	1,10	1,98
2010	4,50	1,10	2,07

Tabela 5.3-5 - Fatores de multiplicação da Tabela 5.2-2 atualizados para o Cenário II

Ano	PAPIB	PAPOP	PAT
1990	3,00	0,90	1,70
2000	5,00	0,80	1,71
2010	5,30	0,70	1,71

Tabela 5.3-6 - Cenário I

Tempo (ano)	CDA (KWh)	Conserv (MWh)	Tarifa (US\$/MWh)	Consumo (MWh)
1990	1387,70	672,99	50,05	48142,55
1995	1487,90	944,95	40,61	66804,93
2000	1047,71	1047,49	50,04	93303,00
2005	1120,16	1931,58	49,91	115668,62
2010	1191,93	2344,26	50,02	145320,21
2015	1314,22	3045,56	49,65	183189,60

e

Tabela 5.3-7 - Cenário II

Tempo (ano)	CDA (KWh)	Conserv (MWh)	Tarifa (US\$/MWh)	Consumo (MWh)
1990	1036,69	672,99	67,00	48142,55
1995	1028,40	1409,85	68,19	61938,34
2000	1068,15	1774,66	67,04	79372,34
2005	1229,81	2410,98	72,48	100908,43
2010	1478,95	3220,52	74,22	130260,39
2015	1824,79	4215,39	73,54	171014,33

Deve-se notar que a alteração no comportamento interno da tarifa, refletido nos valores das tabelas anteriores, naturalmente influenciou nas outras variáveis do laço. Portanto, cada intervenção efetuada na tarifa se propagava pelo sistema e, no passo seguinte (ou no subsequente a este, quando existia atraso), voltava a interferir no comportamento da própria tarifa. Neste momento, havia nova influência da tarifa nestas variáveis, dando continuidade ao ciclo.

Analisando o Gráfico 5.3-1 para toda a série de dados dos valores da tarifa, verifica-se um pequeno decaimento durante alguns anos após o reajuste, tanto no Cenário I quanto no Cenário II.

Veja-se que a tarifa é calculada com base nos investimentos feitos no setor elétrico (que são uma parcela do PIB) e na parcela de consumo utilizada, no modelo, para representar o uso da capacidade instalada. Se há uma redução nesta última parcela (a quantidade de energia), devido ao aumento determinado na tarifa através da adoção de uma política (que é um multiplicador), a tarifa tende, pelo menos inicialmente, a crescer ainda mais. Somente após algum tempo o comportamento da tarifa tende a retornar ao estágio de decaimento anterior à adoção da política, como pôde-se constatar.

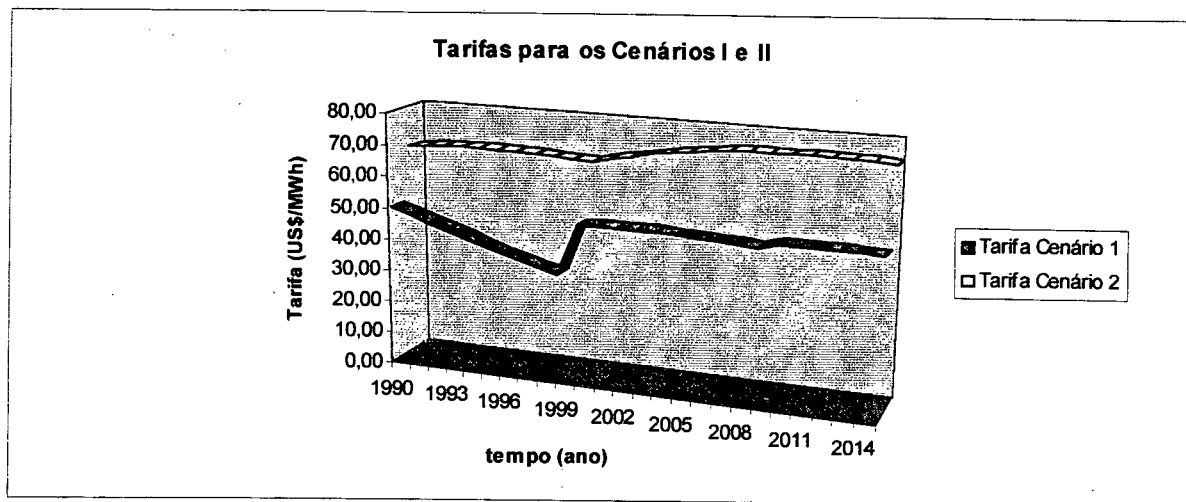


Gráfico 5.3-1 - Tarifas para os Cenários I e II

Esta situação corresponde ao comportamento visualizado no laço interno do diagrama causal da relação consumo-tarifa da Figura 4.7-3.

Comparando-se os dois cenários, lembra-se que, mais do que a análise do valor em si, o que se denota é uma forte tendência de que outras variáveis, além do próprio PIB e/ou População, tenham grande peso na evolução do consumo final, devido às interrelações existentes entre elas.

Veja-se, por exemplo, os Gráficos 5.3-2 e 5.3-3, referentes aos valores das Tabelas 5.2-12 (Análise II, com alteração em PAPIB e PAPOP, ou seja, sem política de ajuste de tarifas) e 5.3-7 (Cenário II, com política de ajuste de tarifas):

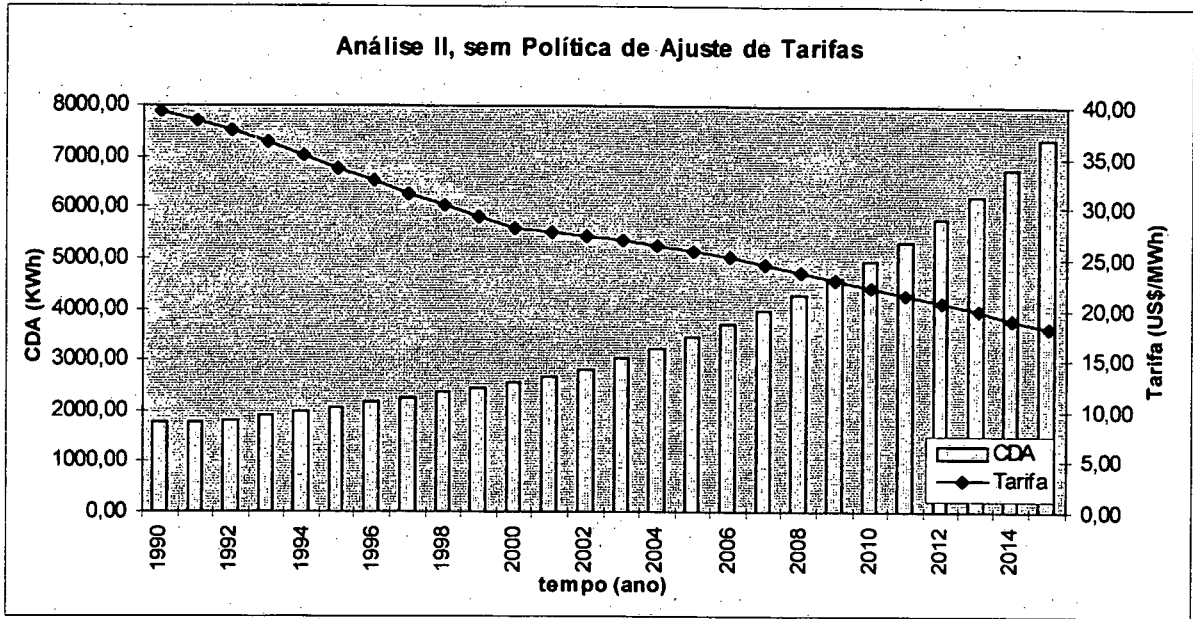


Gráfico 5.3-2 - Análise II, sem Política de Ajuste de Tarifas

e

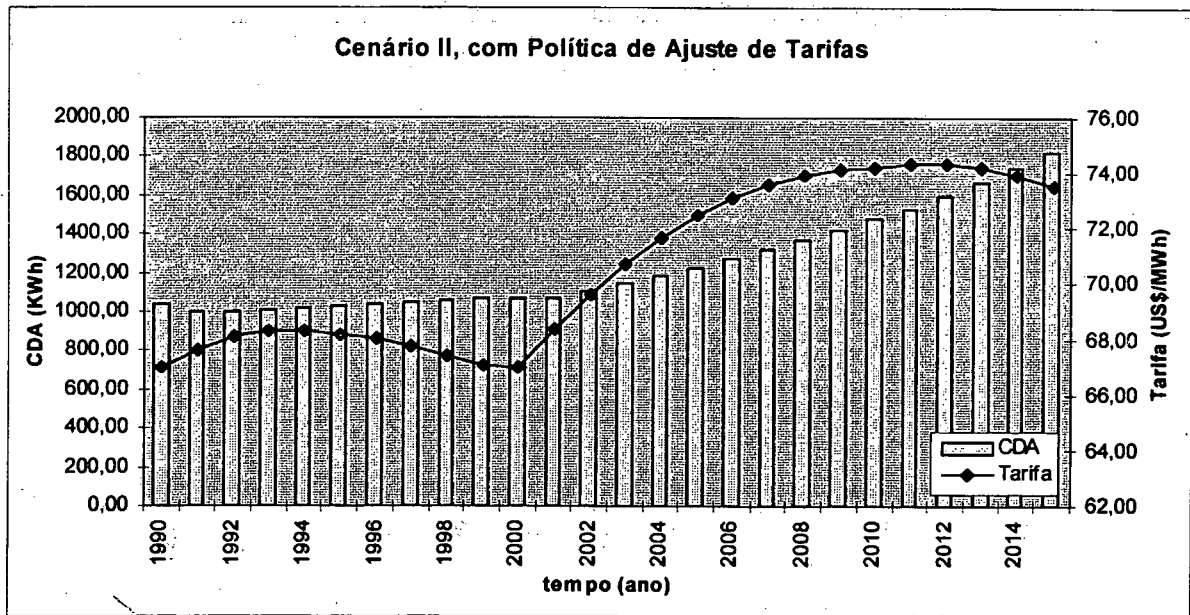


Gráfico 5.3-3- Cenário II, com Política de Ajuste de Tarifas

No caso da Análise II do Gráfico 5.3-2 não se aplicou qualquer ajuste à tarifa. Verifica-se que há um crescimento contínuo e acelerado do consumo por domicílio atendido e um decréscimo da tarifa. No caso do Cenário do Gráfico seguinte (5.3-3), embora haja um aumento médio da tarifa, o consumo por domicílio atendido continua subindo, embora de forma mais suave.

Da mesma forma, a conservação e a tarifa têm uma relação inversa na Tabela 5.2-12, sendo que há um crescimento das duas variáveis na Tabela 5.3-7.

Isto mostra que, dependendo das condições em que se estiver no momento da adoção de políticas e/ou ajustes, podem-se ter comportamentos diversos do que se poderia esperar, resultado da dinâmica interna que faz as variáveis estarem continuamente interagindo entre si.

5.4 - Conclusão

A utilização da Dinâmica de Sistemas, aplicada aos estudos de previsão de mercado do setor residencial, apresentou alguns aspectos importantes do comportamento das variáveis do sistema.

Inicialmente, destaca-se a própria análise das tendências do sistema. Ficou bastante evidente que a combinação da evolução de um conjunto de variáveis pode não ser de fácil visualização. Um exemplo é o resultado alcançado com a simulação dos dois cenários montados, quando o cenário mais desenvolvimentista apresentou um consumo menor que o cenário alternativo, conforme mostrado no Gráfico 5.4-1. Mais uma vez deixa-se claro que a comparação pura e simples de números absolutos deve ser relegada a um segundo plano, pois se trabalhou com um modelo simplificado. Porém, nota-se que variáveis emergentes, como a conservação de energia e a própria tarifa, com a qual se determinaram políticas, tendem a influenciar cada vez mais a evolução do sistema.

Outro aspecto diz respeito às respostas do modelo frente aos impactos ocasionados propositalmente quando dos ajustes feitos através dos multiplicadores, notadamente os da tarifa. Como pôde-se verificar pelos gráficos e tabelas apresentadas, esta reação poderia ser contínua no mesmo sentido da variação inicial, como nos casos dos ajustes feitos nas variáveis População e PIB, ou de equilíbrio no horizonte estudado, como no caso da Tarifa.

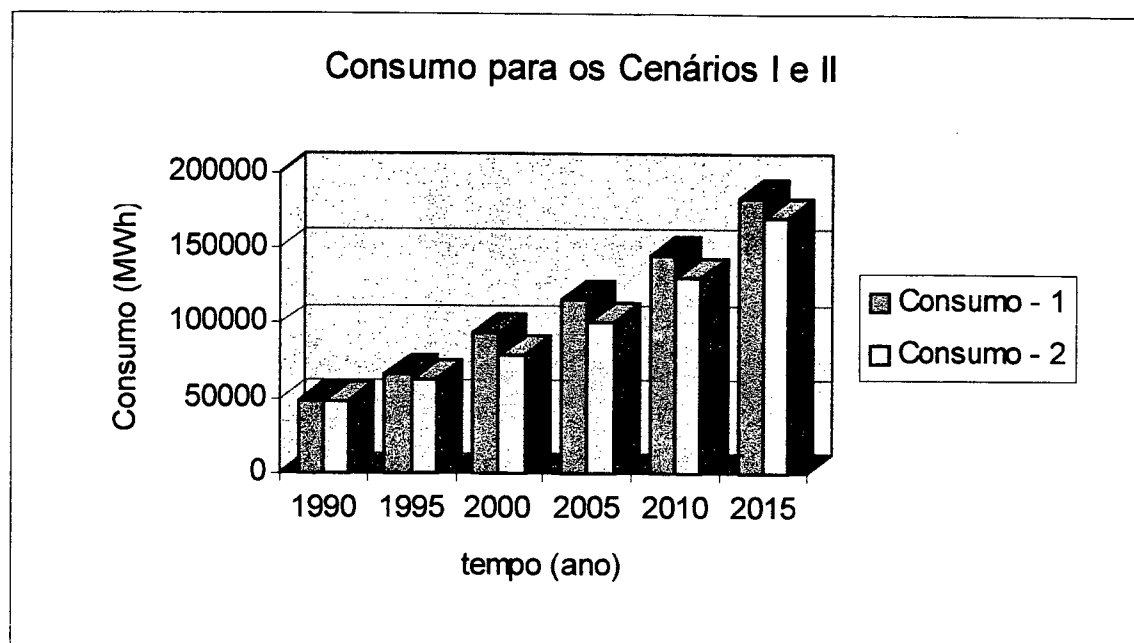


Gráfico 5.4-1 - Consumo para os Cenários I e II

Além disso, as respostas também dependiam do momento da atuação da força externa, ou seja, do multiplicador. Assim, o ajuste feito na tarifa em um ponto do tempo levava o sistema a uma reação contrária, que era a de manter o decaimento da tarifa. Em outras condições, no entanto, ocorria uma evolução das variáveis (àquelas do laço da tarifa) no sentido do ajuste. Somente após certo tempo o sistema passava a alterar novamente o sentido do comportamento das variáveis.

Com isso, pôde-se demonstrar que os estudos de previsão de mercado de energia elétrica têm as características desejáveis para a aplicação da Dinâmica de Sistemas, pois as variáveis que compõem o sistema podem apresentar alterações que não seriam esperadas caso se estivesse utilizando uma simples projeção econométrica, por exemplo. Esta afirmativa torna-se ainda mais válida quando se sabe que a atuação conjunta de um maior número de variáveis tende a tornar os estudos um tanto quanto complexos. Assim, a técnica apresentada constitui-se numa poderosa ferramenta para análises mais apuradas de sistemas reais, nos quais o interrelacionamento das variáveis passa a dispendir um grande esforço computacional e mental.

Deve-se lembrar também que não se dispunha de modelos com os quais se pudessem construir cenários, ou seja, estes mesmos cenários eram desenvolvidos de uma forma subjetiva, sem que se dispusesse de uma explicitação do raciocínio. Com a Dinâmica de

Sistemas, é possível documentar o processo utilizado na construção dos cenários no que diz respeito à definição de todos os parâmetros com os quais se está trabalhando. Dessa forma, o modelo fica disponível para que outro planejador possa reproduzir os cenários, seja para sua simples aferição ou mesmo para aperfeiçoamento ou expansão.

Capítulo 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foram abordadas, neste trabalho, algumas dificuldades encontradas no planejamento de sistemas elétricos, especificamente no tocante à previsão de consumo de energia elétrica do setor residencial.

Como foi discutido nos capítulos iniciais, as condições estáveis que existiam no passado deram lugar a uma situação de constantes variações que estão, a todo momento, influenciando a evolução do sistema. Estas variações se devem à adoção de políticas e, principalmente, ao fato de não se conhecer com certeza o mercado futuro de energia, assim como todo o sistema no qual ele está inserido.

A incerteza inerente ao comportamento futuro das variáveis é um fator que deve ser tratado adequadamente para uma eficaz previsão e, portanto, foi proposta a adoção da Dinâmica de Sistemas como uma técnica que possibilita uma boa representação do sistema de energia, com as suas variáveis e as interrelações entre elas sendo embutidas no próprio modelo.

Os resultados do trabalho mostraram que a modelagem através da Dinâmica de Sistemas pode ser utilizada de uma forma bastante ampla para o planejamento em energia elétrica.

Especificamente para o setor residencial de energia elétrica, demonstrou-se que é possível identificar e projetar tendências de comportamento do consumo futuro, de modo que a construção de cenários resulte em previsões mais confiáveis.

Como pôde-se constatar a partir das simulações com o modelo apresentado, as interrelações entre as variáveis podem provocar alterações não esperadas, quando se considera a expectativa à qual a mente humana estaria condicionada. Este condicionamento provém tanto do uso de modelos tradicionais como da própria visão que se tem do mundo real, pois não é uma tarefa simples prever o comportamento de sistemas de ordem elevada, como é o caso de muitos sistemas reais.

Outro aspecto a ser lembrado é o fato de que não se dispunha de modelos com os quais se pudessem construir cenários, ou seja, os cenários eram construídos de uma forma intuitiva (obviamente que baseado em um conjunto de informações). O que se apresentou

neste trabalho foi um modo de explicitar, na forma de diagramas e equacionamento matemático, o estudo do sistema real e as perspectivas de evolução das variáveis que determinaram as características de cada cenário.

Por certo que deve-se, ainda, aprimorar os estudos no sentido de se refinar a modelagem, assim como no que se refere à elaboração de futuros através de técnicas de cenários. O que se demonstrou aqui foi a necessidade de encontrar novas formas de representar o sistema de energia elétrica (e, pode-se dizer, o sistema sócio-econômico), no sentido de se estar preparado para realizar bons estudos de longo prazo, principalmente quando podem ocorrer alterações na própria estrutura do sistema, levando a uma nova visão das suas características e da forma de como tratá-las.

Como sugestão para futuros estudos, primeiramente, poderia se expandir o modelo apresentado neste trabalho, englobando não somente outras fatias de mercado, como também outros “módulos”, que seriam subsistemas de um modelo mais completo. Assim, poderia-se ter um módulo de geração, um relacionado especificamente à população e outro econômico. Teria-se, então, informações mais trabalhadas que seriam inseridas no modelo de previsão de mercado.

A Técnica apresentada se mostrou eficiente no estudo da adoção de políticas. Sabe-se que o sistema de energia elétrica tende a sofrer grandes mudanças estruturais nos próximos anos, o que exigirá esforços no sentido de estudar o impacto de uma política não somente sobre o sistema, mas também sobre cada empresa que estiver atuando no setor. Assim, será importante o aprimoramento de análises específicas quanto a mecanismos que sirvam para esta atuação no sistema, as políticas, e suas consequências. Sugere-se, portanto, que sejam identificadas outras variáveis, além das apresentadas, que possam ter papel preponderante na execução de políticas.

Finalmente, lembra-se que a Técnica de Dinâmica de Sistemas não se presta somente aos tipos de estudo apresentados neste trabalho, quais sejam o de previsão de mercado, mas também a outras áreas. Dessa forma, fica aqui a sugestão de que o leitor procure identificar em seu trabalho características dinâmicas de comportamento, de modo que possa representá-las adequadamente com o uso da Técnica apresentada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ARAÚJO, J. L. Modelos de Energia para Planejamento. Tese para Concurso de Professor Titular da COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.
- [2] AZEVEDO, J. B. et al. O Mercado de Energia Elétrica no Brasil: Histórico e Perspectivas. In: XII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Recife, 1993.
- [3] BRANDÃO, P. V. Metodologia de Previsão do Mercado de Energia Elétrica. O Mercado de Energia, p 86-89.
- [4] CROUSILLAT, Enrique O. Incorporating Risk and Uncertainty *in* Power System Planning. Revista Energética. Quito, Equador, maio/agosto 1991, Nº 2, p. 163-176.
- [5] DAHER, Mário Jorge. Planejamento da Expansão da Geração com Incerteza de Mercado. Campinas: UNICAMP, 1989 (Dissertação).
- [6] DYNER, Isaac R.; SMITH, Ricardo Q. e PEÑA, Gloria E. System Dynamics Modelling for Residential Energy Efficiency Analysis and Management”, Journal of the Operational Research Society. p. 1163-1173, 1995.
- [7] DYNER, Isaac R.; SMITH, Ricardo Q. e PEÑA, Gloria E. Modelo de Dinamica Energetica Regional. Medellin, Colômbia: COLCIENCIAS, Universidad Nacional de Colombia / sede Medellin, 1994.
- [8] ELETROBRÁS. Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010 Plano 2010: relatório geral / Centrais Elétricas Brasileiras S.A. coordenação Diretoria de Planejamento e Engenharia e Secretaria Executiva do GPCS. Rio de Janeiro.
- [9] ELETROBRÁS. Plano Nacional de Energia Elétrica 1993 / 2015 Plano 2015: relatório executivo - síntese / Centrais Elétricas Brasileiras S.A. coordenação Diretoria de Planejamento e Engenharia e Secretaria Executiva do GPCS. Rio de Janeiro, 1995. V.1, 104 p.

- [10] ELETROBRÁS. Brasil - Perspectivas Macroeconômicas e Energéticas - 1992-2015. Centrais Elétricas Brasileiras S. A., Rio de Janeiro.
- [11] ELETROBRÁS. Levantamento de Novas Metodologias Para Previsão do Mercado de Energia Elétrica (Ênfase ao Método de Cenários). Relatório do Grupo de Trabalho do GCPS/CTEM. Rio de Janeiro, 1988.
- [12] ELETROBRÁS. Plano 2015 - Projeto 5 - Estudos de Transmissão. Brasil, 1992.
- [13] ELETROSUL. Estabelecimento de cenários de expansão do sistema elétrico na área de atuação da Eletrosul: síntese. Florianópolis, V.1, 1984.
- [14] ELETROSUL. Região Sul. Mercado de Energia Elétrica - 1980 / 2020. Técnica de Cenário.
- [15] FARIA, Sérgio Nilo Gomes e PINHEIRO, Solange Fernandes. Análise da Sensibilidade no Curto e Longo Prazos da Demanda de Energia Elétrica a Variações de Renda e Preço, Para Diversas Classes de Consumo. In: XII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Recife, 1993.
- [16] FARIA, S. N. G.; BAJAL, S. J. Um Modelo Integrado de Planejamento da Expansão do Setor Elétrico. Revista Brasileira de Energia, Vol. 4, nº 1, 1994.
- [17] FORTUNATO, Luiz Alberto Machado; Araripe Neto, Tristão de Alencar; Albuquerque, João Carlos Ribeiro de; Pereira, Mário Veiga Ferraz. Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica. Universidade Federal Fluminense, EDUFF - Ed. Universitária. Niterói, RJ, 1990.
- [18] GALLO, Carlos Roberto. Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos Interligados. (xerox)
- [19] GOLDFARB, David. I. e HUSS, William R. Building Scenarios for an Electric Utility. Long Range Planning. Grã-Bretanha, V. 21, nº 2, p. 78-85, 1988.
- [20] GORENSTIN, B. G., CAMPODONICO, N. M., COSTA, J. P. e PEREIRA, M. V. F. Power System Expansion Planning Under Uncertainty. IEEE Transactions on Power Systems, EUA, V.8, nº 1, 1993.

- [21] KAVRAKOGLU, Ibrahim. Energy models. European Journal of Operational Research. n° 28, p. 121-131, 1987.
- [22] KIM, Young-Chang e LEE, Jong-Ho. A New Strategy For Power Development Planning Considering Uncertainty and Environment in the Republic of Korea. Electricity Economics Department, Korea Electric Power Corporation, Seul, Coréia, p. 225-243.
- [23] LATHAM Jr, James H., NORDMAN, Dean A., PLANT, E. Curtis, VOORHIS, John S. Probability Approach to Electric Utility Load Forecasting. IEEE Transactions on Power Systems, V. 87, n° 2, Fev., 1968.
- [24] MEADOWS, Donella H., MEADOWS, Dennis L. RANDERS, Jorgen, BEHRENS III, William W. Limites do Crescimento. Ed. Perspectiva, 2ª ed., São Paulo, 1978.
- [25] MOHAPATRA, P. K. J.; MANDAL, P.; BORA, M. C. Introduction to System Dynamics Modeling. Universities Press, India, 1984.
- [26] MOROZOWSKI, Marciano. Planejamento Integrado de Sistemas Multiárea com Restrições de Energia e de Confiabilidade: Uma Abordagem Via Programação Estocástica. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1995 (Tese).
- [27] MOROZOWSKI, Marciano e RAMOS, Dorel S. Incerteza e Flexibilidade no Planejamento da Transmissão - Conceitos e Metodologia. Anais do IV ERLAC - Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ, IT 37-07, Puerto Iguazu, Argentina, 1991.
- [28] MUMFORD, Lloyd G., SCHULTZ, David E. e TROUTT, Marvin D. Using Spreadsheet Simulation to Generate a Distribution of Forecasts for Electric Power Demand. J. Opl. Res. Soc. Grã-Bretanha, V. 42, n.11, p. 931-939.
- [29] MURPHY, Frederic. H., SEN, Suvrajeet, SOYESTER, Allen L. Accounting for Uncertain Load Forecasts in Electric Utility Capacity Expansion: A Deterministic Equivalence.

- [30] OLADE (Organizacion Latino-Americana de Energia)/ BID (Banco Interamericano de Desarrollo). Modelo Super/Olade-BID - Manual de Referencia (Modulo de Planificacion Bajo Incertidumbre - MODPIN). 1993
- [31] POWERSIM - Manual do Powersim. Noruega, 1996.
- [32] RAMOS, Dorel S. et al. Impacto das Incertezas de Mercado no Planejamento de Sistemas Elétricos. CESP - Companhia Energética de São Paulo, EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [33] RAMOS, Dorel S. e CRUZ, Luís A. Consideração de Incertezas no Planejamento de Geração. Escola Politécnica da USP. São Paulo, p. 151-153.
- [34] SAMOUIDILIS, J. Emmanuel e MITROPOULOS, Costas S. Energy-economy models: A survey. European Journal of Operational Research. N.11, p. 222-232, 1982.
- [35] SCHNEIDER, E. E.; COELHO, D. J. Mercado de Energia Elétrica: Uma Abordagem Global. Informe do Subcomitê de Planejamento e Engenharia de Sistemas Elétricos da ELETROSUL.
- [36] SCHWARTZ, Peter. A Arte da Previsão - Planejando o Futuro em um Mundo de Incertezas. Ed. Página Aberta Ltda. 1. ed. São Paulo, 1995.
- [37] SERRA, M. T. F. Avanços Metodológicos Recentes e Áreas de Investigação Prioritária nos Estudos de Mercado de Energia Elétrica. O Mercado de Energia. Revista do Serviço Público, V. 114. Número especial, p. 90-93.
- [38] STOLL, H. G., with contributing authors, Leonard L. Garver et al. Least-Cost Electric Utility Planning. John Wiley & Sons, Inc., EUA, 1989.
- [39] SURECK, Marco Antonio Amaral. Processo de Planejamento da Geração de Energia Elétrica no Brasil. Brasil, 1989.
- [40] TABORS, Richard D. Transmission System Management and Pricing: New Paradigms and International Comparisons. IEEE Transactions on Power Systems. Columbus, EUA, V. 9, nº 1, p. 206-215, Fev., 1993.

- [41] VASSEL, G. S.; TIBBERTS, N. Power System Planning Under Uncertainty.
American Electric Power Service Corporation, Estados Unidos.
- [42] WOOD, A. J. Load Forecasting. Power Technologies, Inc. 1975

ANEXO I

- EQUAÇÕES DO MODELO -

EQUAÇÕES DO MODELO

Estão mostrados, a seguir, os elementos utilizados no modelo e seus parâmetros.

1 - Variáveis de estado

Tem-se três linhas de descrição. A primeira (init) corresponde ao valor inicial da variável de estado. Logo após (flow), aparece o fluxo que incide nesta variável juntamente com o nome da variável de fluxo correspondente. A terceira linha (identificada como doc), apresenta a descrição da variável.

init Consumo = 8407

flow Consumo = +dt*TCC

doc Consumo = Consumo de energia elétrica [TWh]

init PIB = 120.6e9

flow PIB = +dt*TPIB2

doc PIB = Produto Interno Bruto [US\$] - Ref.: Plano 2015/3

init Pop = 93.1e6

flow Pop = -dt*NM

+dt*NN

doc Pop = Número de habitantes do Brasil - Ref.: Plano 2015/3

init AP = 1

flow AP = +dt*TAP

doc AP = Auxiliar do PIB - Artificio utilizado para reprodução dos dados históricos

2 - Variáveis de fluxo/auxiliares

Nas duas linhas mostradas, encontram-se a equação da variável (aux) e a sua descrição (doc), respectivamente.

aux $NM = Pop * TxMort$

doc $NM =$ Número de mortes - É o produto do número da população pela taxa de mortalidade

aux $NN = Pop * TxNat * PAPOP$

doc $NN =$ Número de nascimentos - É o produto do número da população pela taxa de natalidade (e pela variável de ajuste da População)

aux $TCC = 1/13 * NDA * (CDA * 1e-6) - 1 * Cons / 1000$

doc $TCC =$ Taxa de Crescimento do Consumo - É o produto do número de domicílios atendidos pelo consumo por domicílio e por um fator de ajuste

aux $TPIB = PIB * 15.3\% / RP * PAPIB$

doc $TPIB =$ Taxa de crescimento do PIB - Evolução do PIB com o auxílio do RP-redutor da taxa de crescimento do PIB - e com a influência de PAPIB

aux $TAP = TIME / 1986 / 3$

doc $TAP =$ Variável para auxílio na reprodução dos dados históricos do PIB.

aux $AUX = EXP(TIME / 10) / 4.1e85$

doc $AUX =$ Variável para auxílio na reprodução dos dados históricos da Taxa de Atendimento

aux $CDA = 286 * (RcA / Tarifa) / GRAPH(TIME, 1900, 10, [0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 0.8, 1, 3.6, 6.5, 9.1, 11.7] "Min: 0.8; Max: 13")$

doc $CDA =$ Consumo por domicílio atendido [KWh/ano]

aux $Conserv = 1/3 * TcA * Consumo / 10^3$

doc $Conserv =$ Eficiência em conservação - Taxa constante de conservação de energia (ao longo do tempo) em relação ao montante

aux $dC = \text{Consumo}$

doc $dC = \text{Acréscimo na oferta de energia (média por ano) equivalente ao próprio consumo.}$

aux $dI = \text{PIB} * 1.4\%$

doc $dI = \text{Custo (em US\$) do acréscimo anual de energia, equivalente a 1.4\% do PIB.}$
Ref.: Plano 2010, pag. 191 e 200.

aux $\text{habd} = 197000 / (0.005 * \text{TIME})^{3.95} - \text{EXP}(100/\text{RPC}) * 0.5 - 17.9$

doc $\text{habd} = \text{Número de habitantes por domicílio. Ref.: Plano 2015/3 - Tab 3.4.1.}$

aux $\text{NDA} = \text{NTD} * \text{TxA} / 100$

doc $\text{NDA} = \text{Número de domicílios atendidos - Produto do Número Total de Domicílios pela Taxa de Atendimento e por um fator de ajuste.}$

aux $\text{NTD} = \text{Pop} / \text{habd}$

doc $\text{NTD} = \text{Número total de domicílios. Ref.: Plano 2015/3 - Tab 3.4.1.}$

aux $\text{RcA} = \text{DELAYINF}(\text{RPC}, \text{At1}, 1, 1232)$

doc $\text{RcA} = \text{RPC com atraso - Significa que variações na RPC influenciarão o CDA somente após passado certo tempo (depende de ATRASO).}$

aux $\text{RPC} = \text{PIB} / \text{Pop}$

doc $\text{RPC} = \text{Renda per capita}$

aux Tarifa

$=$
 $(dI/dC) * 0.000192 * \text{GRAPH}(dC, 1900, 10, [0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.04, 1.55, 1.86, 2.07, 2.21] \text{"Min:0.01;Max:2.5"}) * \text{PAT}$

doc $\text{Tarifa} = \text{Tarifa [US\$/MWh]} - \text{É a razão entre a variação do custo e a variação do consumo. Ref.: Ver comportamento da evolução da tarifa no Plano 2010, pág. 198 e Plano 2015/3, pág. 33.}$

aux $TcA = DELAYINF(Tarifa, At2, 1, 1)$

doc $TcA =$ Corresponde à Tarifa porém com um atraso.

aux $TxA = MIN(((RPC/29.8)+2*AUX),100)$

doc $TxA =$ Taxa de Atendimento - Varia em função da RPC (até um máximo de 100%)

3 - Constantes

Nas duas linhas mostradas, encontram-se o valor da constante (const) e a sua descrição (doc), respectivamente.

const $At1 = 1$

doc $At1 =$ Tempo representativo do atraso entre variações da RPC e CDA (em unidades de tempo de simulação).

const $At2 = 1$

doc $At2 =$ Tempo representativo do atraso entre variações da Tarifa e Conservação (em unidades de tempo de simulação).

const $PAPIB = 1$

doc $PAPIB =$ Política de ajuste do PIB - Utilizado para representa um crescimento ou retração na evolução da economia.

const $PAPOP = 1$

doc $PAPOP =$ Política de ajuste da POP- Utilizado para representa um crescimento ou retração na evolução da população.

const $PAT = 1$

doc $PAT =$ Política de Ajuste de Tarifas - Esta variável foi incluída no modelo devido à indicação, no Plano 2015 (Vol I, Pág. 26), de uma política de aumento real das tarifas.

const Tx Mort = 1.07%

doc Tx Mort = Taxa de mortalidade

const Tx Nat = 3.3%

doc Tx Nat = Taxa de natalidade

ANEXO II
- DADOS HISTÓRICOS -

DADOS HISTÓRICOS

variável ano	PIB (10⁹ US\$)	POP (10⁶ hab)	Consumo (MWh)
1970	120,60	93,14	8407
1971	134,20		9139
1972	150,20		9849
1973	171,20		10919
1974	185,20		11998
1975	194,90	107,15	13208
1976	215,00		14842
1977	225,50		17122
1978	236,80		18787
1979	252,90		21098
1980	276,30	119,00	23277
1981	264,10		25060
1982	265,70		27078
1983	256,70		29747
1984	270,30		30948
1985	291,90	131,98	32670
1986	313,80		35780
1987	325,10		38407
1988	324,80		40564
1989	335,20		43718
1990	320,00	144,72	48050

variável ano	NTD (10⁶ dom)	Tx de Atend. (%)	CDA (KWh)
1970	18434,2	45	1232
1971	19044,7	47	1276
1972	19691,5	49	1283
1973	20374,5	52	1313
1974	21093,6	55	1350
1975	21849,3	58	1394
1976	22640,6	61	1432
1977	23468,4	62	1512
1978	24332,3	63	1535
1979	25232,5	65	1575
1980	26168,9	66	1599
1981	27141,5	72	1593
1982	28150,3	74	1581
1983	29195,2	75	1619
1984	30276,4	76	1588
1985	31327,8	79	1577
1986	32330,7	80	1630
1987	33341,4	81	1669
1988	34354,8	83	1688
1989	34577,4	85	1726
1990	34800	87	1820

variável ano	Tarifa (US\$/MWh)
1970	
1971	
1972	
1973	
1974	83
1975	90
1976	80
1977	75
1978	72
1979	69
1980	65
1981	72
1982	67
1983	59
1984	54
1985	57
1986	51
1987	62
1988	61
1989	45
1990	49

Descrição e referência das variáveis:**PIB - (10⁹ US\$)**

- ⇒ Produto Interno Bruto (dado em bilhões de dólares)
- ⇒ Plano 2015 - Projeto 3

POP - (10⁶ hab)

- ⇒ População (dada em milhões de pessoas)
- ⇒ Fonte: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Consumo (MWh)

- ⇒ Consumo de energia elétrica (dado em MWh)
- ⇒ Plano 2015 - Projeto 3, p. , Tab)

NTD - (10⁶ dom)

- ⇒ Número total de domicílios (dado em número de domicílios)
- ⇒ Plano 2015 - Projeto 3

Tx de Atend. (%)

- ⇒ Taxa de atendimento (dada como percentual de atendimento)
- ⇒ Plano 2015 - Projeto 3

CDA - (KWh)

- ⇒ Consumo por Domicílio Atendido (dado em KWh)
- ⇒ Plano 2015 - Projeto 3

Tarifa (US\$/MWh)

- ⇒ Tarifa de energia elétrica (dada em US\$/MWh)
- ⇒ Plano 2015 - Projeto 3