

Relatório Técnico

Nº/Ano: XXXX/2016 **Nº de Páginas:** **Nº de Anexos:**

Título:

Departamento: Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente - DEA

Área de Responsabilidade: B200 **Conta de Apropriação:** 1781

Cliente:
Ministério de Minas e Energia – MME
Esplanada dos Ministérios Bloco U – sala 552
5º. andar – CEP: 70065-900 – Brasília – DF
Atenção: Sr. Gilberto Hollauer

Resumo:

Autores:
Carlos Henrique Medeiros de Sabóia – Cepel
Luiz Guilherme Barbosa Marzano – Cepel

Palavras-Chave:
Matriz energética
Planejamento da expansão de longo prazo
Classificação:

Gerente de Projeto

Nome: Luiz Guilherme Barbosa Marzano

Tel.: (21)25986065 **Fax:** (21)25986482
E-mail: marzano@cepel.br

Chefe do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente
Maria Elvira Piñeiro Maceira

Tel.: (21)25986454 **Fax:** (21)25986482
E-mail: elvira@cepel.br

Aprovação

Roberto Pereira Caldas
Diretor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
/ /

Manual de Metodologia

Modelo MATRIZ

Versão 4.1.1

Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente

DEA/CEPEL

Índice

1	Introdução	4
2	Modelos de Otimização de Sistemas Energéticos (Bottom-Up).....	6
3	Formulação Matemática do Modelo MATRIZ.....	8
	3.1 Cadeia da eletricidade.....	11
	3.2 Proposta de Modelagem da Cadeia de Gás Natural	15
	3.3 Função Objetivo.....	22
	3.4 Restrições de Expansão.....	24
	3.5 Restrições de Operação.....	26
	3.6 Restrições Flexíveis	32
	3.6.1 Restrições de Expansão da Capacidade	32
	3.6.2 Restrições de Limites Operativos.....	34
	3.6.3 Restrições de Participação na Matriz Energética.....	35
	3.6.4 Restrições de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE).....	36
	3.6.5 Restrição de Segurança Energética em Derivados de Petróleo	37
4	Caso exemplo simplificado.....	39
	4.1 Estrutura das Cadeias do Carvão e da Lenha.....	39
	4.2 Dados.....	42
	4.2.1 Dados Gerais.....	42
	4.2.2 Dados das Reservas	43
	4.2.3 Dados de Curvas Típicas de Variação Diurna e Sazonal.....	43
	4.2.4 Dados de Demandas	43
	4.2.5 Coeficientes Técnicos das Tecnologias.....	44
	4.2.6 Dados Adicionais.....	53
	4.3 Resultados	55
5	Referências.....	58
6	Apêndice A – Diagrama das cadeias do carvão e da lenha.....	60
7	Apêndice B - Coeficientes Técnicos Históricos	61
8	APÊNDICE C - Fatores sazonais e de patamar (horosazonais).....	76

1 Introdução

O planejamento energético integrado é uma atividade que assume importância cada vez maior no Brasil e no mundo, tendo em vista as preocupações crescentes com a segurança energética e com mudanças climáticas globais. Este planejamento consiste em estudos que buscam definir uma seleção racional das alternativas dos meios de produção, transporte e uso de energia, minimizando, de forma global, os custos de investimento, operação e manutenção.

Uma alternativa é basear o planejamento energético em planejamentos setoriais. Apesar de os planejamentos setoriais permitirem uma análise individual dos setores energéticos mais detalhada, não conduzem necessariamente à otimização global do sistema energético. Além disso, a qualidade de um planejamento setorial torna-se questionável para sistemas energéticos bastante integrados, que é a tendência dos sistemas atuais. O desenvolvimento recente de novas tecnologias para atendimento às demandas de energia tem resultado em uma crescente integração das cadeias energéticas. Por exemplo, os carros *flex*, que podem utilizar como combustível tanto a gasolina (cadeia do petróleo) quanto o etanol (cadeia da biomassa). Por outro lado, já foram desenvolvidos vários modelos computacionais para o planejamento energético integrado, em uso em diversos países. De forma geral, esses modelos podem ser classificados em:

- modelos econômico-energéticos, ou modelos top-down;
- modelos de otimização de sistemas energéticos, ou modelos bottom-up.

Os modelos econômico-energéticos também denominados modelos de equilíbrio geral, utilizam conceitos da macroeconomia representando as atividades econômicas agregadas através de um conjunto pequeno de variáveis e de relações matemáticas descrevendo o comportamento de agentes nos diversos mercados de bens, serviços e fatores de produção. Cada setor da economia é representado por uma função (função de produção), relacionando a sua produção econômica aos fatores trabalho, capital e energia, não sendo as tecnologias de conversão energética representadas explicitamente. Exemplos deste tipo de modelagem são os modelos MERGE [8]-[9] e DEMETER [10]-[12].

Os modelos de otimização de sistemas energéticos utilizam uma abordagem de engenharia de sistemas, com representação detalhada das tecnologias de extração, transformação, transporte, distribuição e consumo de energia. Por outro lado, a representação do resto da economia é bastante simplificada. Exemplos deste tipo de modelagem são os modelos MESSAGE [14]-[15] e MARKAL [16], que são os modelos mais comumente usados em todo o mundo.

Existem ainda os modelos chamados híbridos que procuram promover a interação entre os modelos macroeconômicos e os modelos de otimização energética, por exemplo, modelos MESSAGE-MACRO [15] e MARKAL-MACRO [13].

No Brasil, o modelo MESSAGE foi usado em estudos recentes de planejamento de longo prazo [17]-[18] realizados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Nesses estudos ficaram evidenciadas algumas limitações que este modelo apresenta para uma adequada representação do sistema energético brasileiro. Estas limitações estão principalmente relacionadas com a representação da cadeia da eletricidade, que é mais complexa no Brasil devido à predominância da geração hidráulica.

Está em desenvolvimento pelo CEPEL um modelo computacional do tipo bottom-up, denominado MATRIZ, capaz de determinar projeções futuras da matriz energética brasileira, levando em consideração de forma mais adequada as especificidades do sistema energético nacional. Procurou-se desenvolver um modelo flexível de forma a incorporar com facilidade as mudanças que podem ocorrer em um sistema energético com o aparecimento eventual de novas tecnologias. Nesse sentido, o modelo MATRIZ apresenta formulação matemática genérica que permite representar as diversas composições de tecnologias de uma cadeia energética assim como seu acoplamento a outras cadeias energéticas, portanto, capaz de representar um sistema energético integrado. As incertezas hidrológicas podem ser tratadas de forma simplificada, de forma análoga àquela adotada no modelo MELP [1]-[3], através da análise da operação para os cenários de hidrologia média e crítica.

Esse manual descreve a metodologia implementada no modelo MATRIZ, desenvolvido inicialmente tendo como foco uma primeira aplicação às cadeias do carvão e lenha, sendo posteriormente estendido as mais diversas cadeias energéticas.

Como exemplo, nesta primeira aplicação, a função objetivo considerada consiste na minimização da soma dos custos de investimentos em novos equipamentos de extração e/ou de transformação do carvão e de seus custos de operação, necessários para o pleno atendimento a evoluções exógenas, ao longo do horizonte de estudo, das demandas finais de carvão metalúrgico, carvão vapor, coque, gás de coque, alcatrão, lenha, carvão vegetal, e eletricidade de origem em térmicas a carvão. Restrições operativas, de vida útil dos equipamentos, de limites de exploração de reserva primária, dentre outras, são levadas em consideração.

2 Modelos de Otimização de Sistemas Energéticos (Bottom-Up)

De forma geral, um sistema energético pode ser descrito como um conjunto de reservas de energia primária e um conjunto de equipamentos (tecnologias) especializados capazes de transformar a energia primária em serviços energéticos. As transformações ocorrem usualmente de forma encadeada, passando por vários níveis de energia: primário, secundário, final e útil.

Energias primárias são aquelas que existem livremente na natureza. Elas podem ser renováveis, como a energia hidráulica, eólica, solar, biomassa, etc, ou não renováveis, isto é, obtidas por extração de reservas naturais como o petróleo, gás natural, carvão mineral, minério de urânio, lenha e outros.

Energias secundárias são obtidas em centros de transformação de energia, e se dirigem para centros de consumo ou para outros centros de transformação. Um exemplo de centro de transformação são as refinarias, onde a partir do óleo cru são derivados, dentre outros, a gasolina, o óleo diesel, o querosene, o gás liquefeito, os quais têm uso direto, além do óleo combustível, que passa por um outro centro de transformação, onde é convertido em eletricidade.

Energia final é a energia tal como ela é recebida pelo consumidor, nas suas várias formas (eletricidade, combustíveis, gás, etc.). Finalmente, energia útil é aquela que dispõe o consumidor depois da última conversão feita nos seus próprios equipamentos. Em outras palavras, trata-se da energia final diminuída das perdas na conversão. Exemplos típicos de energia útil são: força motriz, aquecimento direto, calor de processo, iluminação, eletroquímica e outros.

De forma sucinta, a cada nível de energia são definidas formas de energias as quais serão transformadas pelas tecnologias em outras formas de energia, conforme ilustrado na Figura 1.

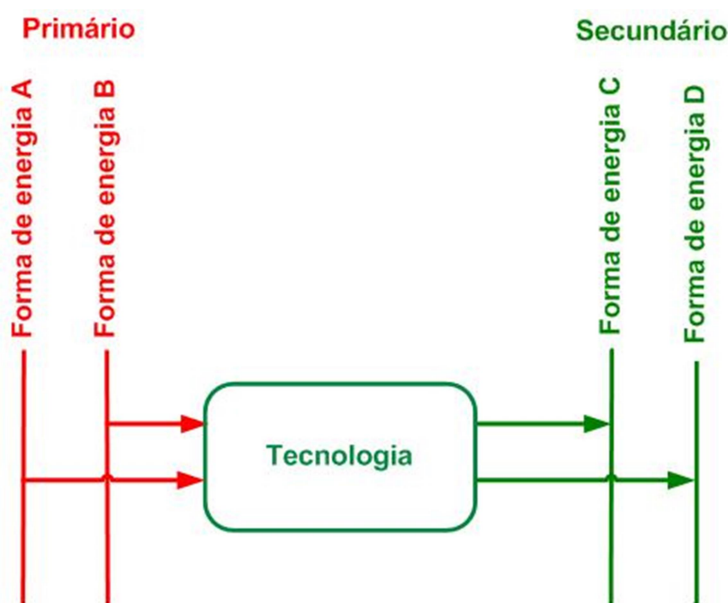


Figura 1. Exemplo de transformações energéticas

Usualmente os equipamentos são agrupados em equipamentos de extração de energia primária das reservas, de transformação das diferentes formas de energia primária em formas de energia secundária, de transporte e distribuição das diferentes formas de energia, e os capazes de transformar formas de energia secundária em serviços energéticos. Podem ser considerados ainda no sistema energético equipamentos para estocagem, importação e exportação de diferentes formas de energia. A Figura 2 ilustra o diagrama esquemático de um exemplo simplificado da cadeia do carvão.

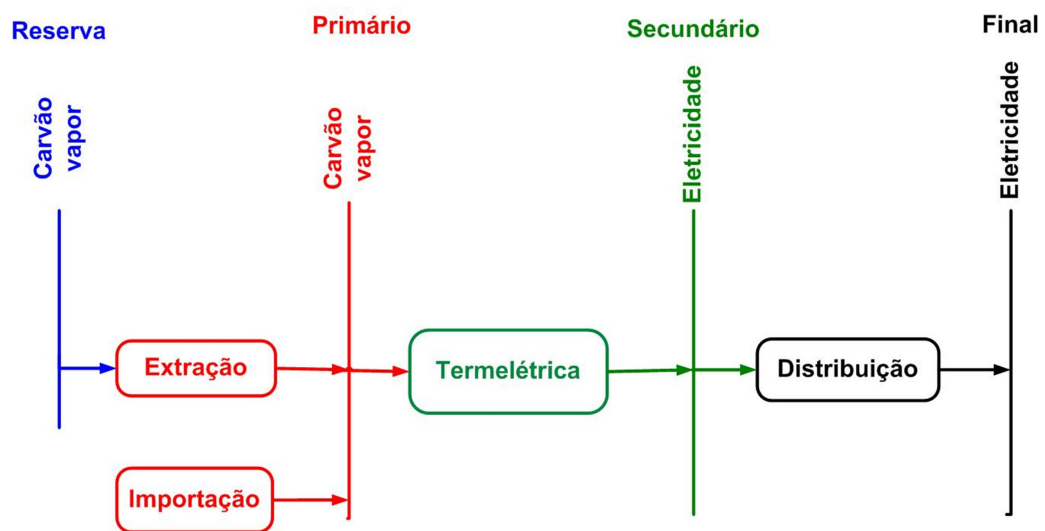


Figura 2. Cadeia simplificada do carvão

A configuração do sistema energético, assim como a intensidade em que seus equipamentos são operados, modifica-se ao longo do tempo respondendo à evolução das demandas por serviços energéticos, ao esgotamento de reservas e descoberta de novas e à necessidade de reposição de equipamentos que atingem o fim de suas vidas úteis ou se tornam obsoletos pelo surgimento de tecnologias mais econômicas. A modelagem matemática de sistemas energéticos permite descrever, prever e dimensionar a evolução dinâmica de sistemas nacionais, regionais ou multiregionais, sendo instrumento de grande valia no planejamento energético.

Existe no mundo uma variedade de modelos de otimização de sistemas energéticos desenvolvidos com diferentes focos e que encontram aplicações tanto nas análises da evolução de longo prazo do sistema energético mundial [15], quanto na análise de sistemas nacionais interligados de geração de energia elétrica, seja em termos da sua expansão [1]. Dentre os modelos de otimização aplicáveis às análises de cenários energéticos de longo prazo (mais de 20 anos) de sistemas energéticos integrados nacionais/regionais, cita-se no cenário internacional os modelos MESSAGE e MARKAL.

3 Formulação Matemática do Modelo MATRIZ

O objetivo da formulação é resolver o problema de planejamento da expansão do sistema energético brasileiro pela determinação de uma estratégia de expansão das capacidades das tecnologias de transformação de energia que atendam às demandas futuras ao longo do horizonte de planejamento das diversas formas de energia e minimize os custos atualizados de construção e operação.

O horizonte de planejamento é dividido em K períodos de múltiplos anos, sendo todos os anos de um período considerados idênticos. Cada período é definido por um ano qualquer de seu intervalo de tempo, definido como ano de estudo, usualmente o primeiro ano. São definidos ainda o ano base, que é um ano histórico que serve para ajustar os diversos parâmetros do modelo, e o ano final, que delimita a extensão do último período. Os períodos não precisam ter necessariamente o mesmo número de anos.

As expansões de cada período são definidas em termos anuais, consideradas todas como disponíveis no início do primeiro ano do período, e seus custos de investimentos considerados como incorridos no primeiro ano do período. A análise de atendimento às demandas é feita para cada período também em termos anuais e os custos de operação de todos os anos do período considerados como incorridos no meio do período, conforme ilustrado na Figura 3.

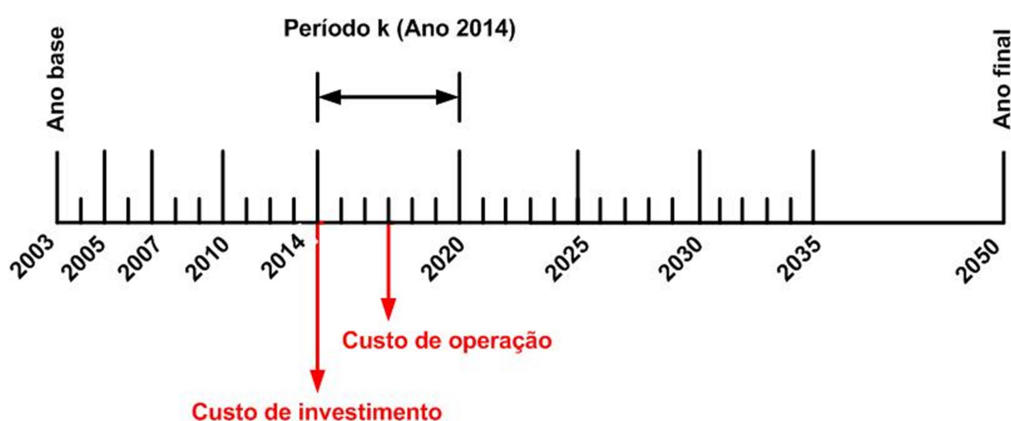


Figura 3. Horizonte de planejamento

Existem demandas e tecnologias que apresentam um comportamento variável ao longo do ano e/ou ao longo do dia. No caso da demanda, um exemplo típico é a variação do consumo de energia elétrica do setor residencial, que em países de clima quente é maior nos meses verão, por conta da necessidade de refrigeração dos recintos, e nos países de clima frio, nos meses de inverno (se o aquecimento for feito por equipamentos elétricos). Tecnologias que operam de forma variável, de maneira geral, são algumas tecnologias que produzem eletricidade ou aquecimento, como é o caso das usinas termelétricas a bagaço de cana de açúcar, que operam nos meses da colheita da cana de

açúcar (variação sazonal), as células fotovoltaicas, que operam em função da luz solar (variação diurna), além de outras. Nesses casos, é necessário levar em consideração estas variações para assegurar um pleno atendimento às demandas em qualquer momento. Isto é feito através de uma análise mais detalhada do atendimento à demanda, dividindo-se o ano em NZ estações e estas em L patamares de carga¹, conforme ilustrado na Figura 4.

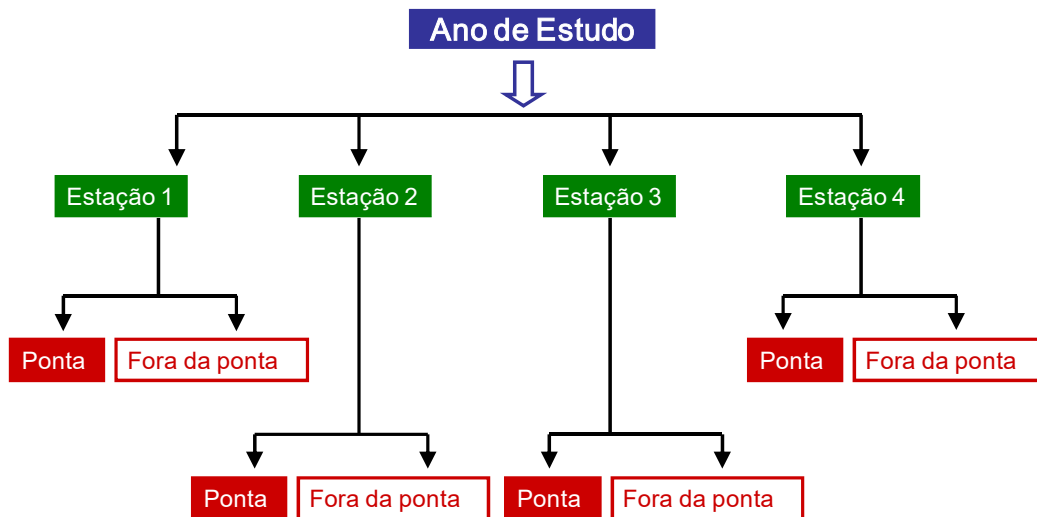


Figura 4. Estações do ano e patamares de carga

As tecnologias são representadas como consumidoras de uma ou mais formas de energia e produzindo uma ou mais formas de energia a coeficientes constantes² (η), conforme ilustrado na Figura 5.



Figura 5. Representação esquemática de uma tecnologia

Para cada tecnologia i associa-se uma variável de expansão para cada período k x_i^k , e uma variável de operação para cada período k e estação sz e patamar l $y_i^k(l, sz)$.

¹ No modelo MATRIZ, definiu-se um número máximo de estações igual a 4 e de patamares igual a 2.

² Exceções são as tecnologias de extração que consomem reservas, tecnologias produtoras de energia primária renovável (por exemplo, madeireiras e hidrelétricas) e tecnologias de importação que não consomem nenhuma forma de energia e tecnologias de exportação que não produzem forma de energia.

Estas variáveis são definidas levando-se em conta a escolha para a tecnologia i de uma das formas de energia a ela relacionadas, podendo ser uma forma de energia consumida ou produzida pela tecnologia, para ser considerada como a “energia de referência” da tecnologia, conforme ilustrado na Figura 6.

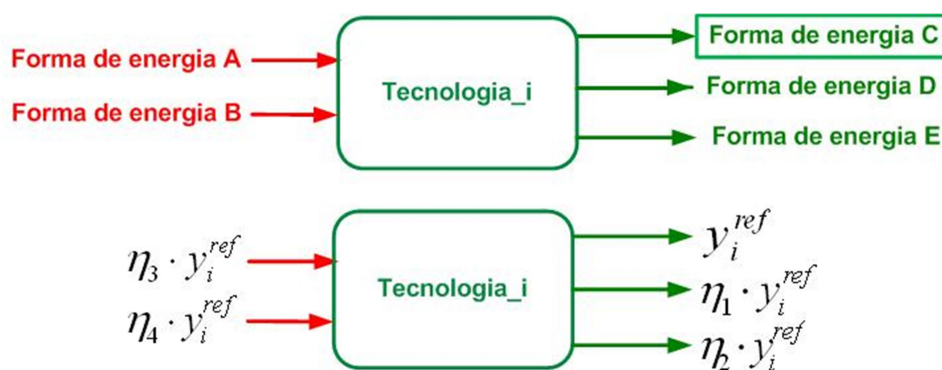


Figura 6. Representação esquemática da operação de uma tecnologia

Definindo-se a capacidade de uma tecnologia no período k como o montante da energia de referência que pode ser produzido ou consumido pela instalação ao longo de um ano do período k , considerando operação ininterrupta com fator de capacidade igual a um, as variáveis x_i^k se referem às adições no período k nestas capacidades.

As adições de capacidade podem estar sujeitas a restrições de expansões anuais mínimas e máximas e serão penalizadas na função objetivo por um custo unitário de investimento CI e por penalidades por impactos causados pela expansão no sistema socioambiental CA. Modelam-se estes impactos através de uma decomposição em componentes síntese do sistema socioambiental. De forma consistente, as variáveis de operação $y_i^k(l, sz)$ se referem ao montante da energia de referência produzido ou consumido num ano do período k , na estação sz e patamar de carga l , podendo também estarem sujeitas a restrições e penalizadas na função objetivo por um custo unitário de operação CO e por penalidades no caso de emissão de poluentes CE.

É possível, a exceção do caso de extração, modelar tecnologias que possuem flexibilidade para operar em mais de um modo de operação, devendo-se então definir as formas de energia consumidas e produzidas, seus coeficientes, custos unitários de operação e a energia de referência para cada modo de operação. Adicionalmente, define-se o primeiro modo de operação como referência para definição da capacidade da tecnologia. Os limites de operação da tecnologia nos outros modos de operação (capacidades) são considerados proporcionais à capacidade de referência através de coeficientes calculados pela fração entre a capacidade de referência e a capacidade nos outros modos

de operação (isto é, montante de energia de referência que pode ser consumido ou produzido ao longo de um ano do período k , considerando operação ininterrupta com fator de capacidade igual a um).

Quando for esse o caso, ao invés de uma variável de operação, cria-se uma variável de operação específica $y_{i,z}^k(l,sz)$ para cada modo de operação z , que se refere ao montante da energia de referência produzido ou consumido por este modo de operação num ano do período k , na estação sz e patamar de carga l (Figura 7 a seguir).

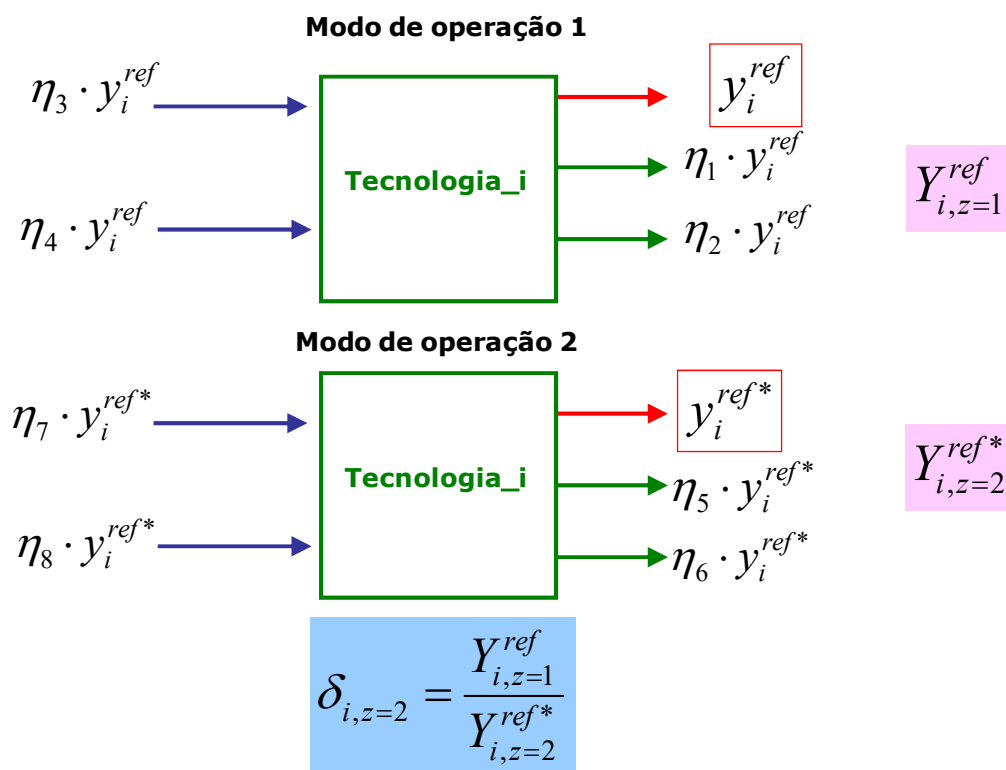


Figura 7. Modelagem de tecnologia com mais de um modo de operação

3.1 Cadeia da eletricidade

O parque gerador do sistema elétrico brasileiro possui predominância hidráulica, e esta característica deve permanecer pelas próximas duas ou três décadas em função do grande potencial hidrelétrico competitivamente econômico ainda a ser explorado na região amazônica. As incertezas associadas às afluições futuras aos reservatórios das usinas hidrelétricas aumentam a complexidade do problema de planejamento da expansão no que diz respeito ao cálculo da operação das tecnologias. Essas incertezas se estendem às outras cadeias em função do acoplamento existente entre elas através das usinas termelétricas.

Uma modelagem detalhada destas incertezas inviabiliza a solução do problema do ponto de vista computacional, entretanto, a não representação das mesmas pode conduzir a soluções pouco adequadas. Se a oferta de energia hidráulica for definida em função de uma condição hidrológica favorável, a confiabilidade de atendimento à demanda futura de energia pode ficar comprometida em caso de ocorrência de uma condição hidrológica crítica em um dado período do horizonte de planejamento (i.e. plano de expansão subdimensionado). Por outro lado, a oferta de energia hidráulica com base em um cenário hidrológico crítico pode comprometer a comparação econômica entre os projetos de geração elétrica, podendo resultar em um plano de expansão confiável, porém com elevado custo de atendimento à demanda (i.e. plano de expansão sobredimensionado).

Uma modelagem simplificada das incertezas hidrológicas foi proposta para o modelo MELP, que resolve o problema do planejamento de longo prazo da expansão da geração e troncos de interligação do sistema elétrico brasileiro. Esta modelagem simplificada foi também adotada no modelo MATRIZ e consiste basicamente na análise da operação, para cada estágio do horizonte do planejamento, para os cenários de hidrologia média e crítica. Essas análises operativas estendidas às outras cadeias energéticas permitem um planejamento global mais adequado, garantindo os investimentos necessários para o fornecimento de combustível às termelétricas nas duas condições hidrológicas. A análise operativa considerando a condição de hidrologia média é feita para avaliar os custos com combustíveis das termelétricas, enquanto que a análise operativa para a condição de hidrologia crítica é feita para garantir um plano de expansão com pleno atendimento à demanda futura de energia.

Em termos matemáticos, essa modelagem implica na duplicação das variáveis de operação das tecnologias, assim como na duplicação das restrições operativas. Para as tecnologias de geração de energia da cadeia da eletricidade, esta modelagem implica em limites máximos de geração anual distintos para cada condição hidrológica, quais sejam: energia média para a condição de hidrologia média, e energia firme para a condição de hidrologia crítica. Para usinas hidrelétricas, estes valores podem ser obtidos através de simulações de modelos computacionais, como o SUSHI [6]-[7], ou estimados com base nos dados do inventário das bacias hidrográficas. As usinas termelétricas operam de forma complementar em sistemas elétricos com predominância hidráulica, e seus limites operativos em cada condição de hidrologia dependem da configuração do sistema elétrico e dos custos dos combustíveis que as suprem. No modelo MELP, estes limites têm sido estimados com base em simulações do programa NEWAVE [4]-[5].

De maneira simplificada a formulação matemática do MATRIZ, considerando duas estações sazonais e um único patamar da curva de carga, pode ser descrita como:

$$\begin{array}{rcl}
 \min_{s.a.} & z^T x & + d^T y_m^1 + d^T y_m^2 \\
 & Ax & \leq b \quad (1) \\
 \hline
 & M_1 y_m^1 & \leq L_{ext} \quad (2) \\
 & M_2 y_m^1 & \geq 0 \quad (3) \\
 & M_3 y_m^1 & \geq m^1 \quad (4) \\
 & E_m f^1 x + Dy_m^1 & \geq h \quad (5) \\
 \hline
 & M_1 y_m^2 & \leq L_{ext} \quad (6) \\
 & M_2 y_m^2 & \geq 0 \quad (7) \\
 & M_3 y_m^2 & \geq m^2 \quad (8) \\
 & E_m f^2 x + Dy_m^2 & \geq h \quad (9) \\
 \hline
 & M_1 y_c^1 & \leq L_{ext} \quad (10) \\
 & M_2 y_c^1 & \geq 0 \quad (11) \\
 & M_3 y_c^1 & \geq m^1 \quad (12) \\
 & E_c f^1 x + Dy_c^1 & \geq h \quad (13) \\
 \hline
 & M_1 y_c^2 & \leq L_{ext} \quad (14) \\
 & M_2 y_c^2 & \geq 0 \quad (15) \\
 & M_3 y_c^2 & \geq m^2 \quad (16) \\
 & E_c f^2 x + Dy_c^2 & \geq h \quad (17) \\
 \hline
 & y_m^1 + y_m^2 & \leq V_T \quad (18)
 \end{array}$$

Nesta formulação, os vetores x e z representam as variáveis inteiras de investimento e seus respectivos custos, os vetores y e d representam as variáveis contínuas de operação e seus respectivos custos, utilizando-se o subscrito "m" para denotar a condição de hidrologia média e "c" a condição de hidrologia crítica, e o sobrescritos "1" e "2" as estação sazonais. As restrições do tipo (1) são aquelas referentes aos limites de expansão dos projetos de investimento. As restrições de (2) a (9) representam a operação do sistema na condição de hidrologia média, sendo (2) e (6) os limites de extração das reservas, (3) e (7) os balanços de produção e consumo das formas de energia, (4) e (8) o balanço de demanda na 1ª e 2ª estação sazonal, e (5) e (9) o acoplamento entre o problema de investimento e operação. De forma análoga têm-se as restrições de (10) a (17) representando a operação do sistema na condição de hidrologia crítica. A restrição (18) limita a extração total das reservas ao volume disponível no início do estudo.

Em resumo, o conjunto de restrições implementadas inclui:

- i. Limitações de investimento em expansão nas capacidades das tecnologias;
 - Expansão total mínima e máxima em cada período k (opcional)
 - Expansão total mínima e máxima acumulada até o período k (opcional)
- ii. Limites das extrações das reservas;
 - Restrições de extração anual das reservas em cada período k (opcional)
 - Restrições de extração acumulada até o período k inclusive (opcional)
 - Extração total limitada ao volume disponível no ano Base (automática), calculada com base na operação associada ao cenário de hidrologia média
- iii. Balanços das formas de energia intermediárias (primárias e secundárias), para ambos os cenários hidrológicos;
- iv. Balanços de atendimento das demandas, para ambos os cenários hidrológicos;
- v. Limites operativos acoplados às decisões de expansão, para ambos os cenários hidrológicos:
 - Limites mínimo e máximo da operação de cada tecnologia i associados a sua capacidade disponível, em cada patamar l , estação sz e período k (automático)
 - Limites mínimo e máximo anuais da operação de cada tecnologia i , modo de operação z , em cada período k (opcional)

Vale lembrar também que no modelo MATRIZ podem ser representados os mais diferentes tipos de cadeias energéticas, diferentemente do modelo MELP que trata apenas do setor elétrico integrado ao sistema de gás natural [19]. Além disso, apesar da representação agregada das tecnologias, outro ponto importante do modelo MATRIZ é que o mesmo não está limitado a representar em cada cadeia apenas alguns tipos predefinidos de tecnologias. Tomando-se novamente o MELP como exemplo, na representação do sistema de gás natural, existe a possibilidade de se considerar apenas os gasodutos e unidades de regaseificação de GNL (gás natural liquefeito). No modelo MATRIZ é possível se representar, além destas tecnologias citadas, os gasodutos de gás úmido onde é possível extrair também LGN (líquidos de gás natural), as UPGN (unidades de processamento de gás natural), as tecnologias de extração em terra ou em mar de gás natural úmido associado ao petróleo, entre outras. Além disso é possível modelar a concorrência existente, por exemplo no setor de transportes, entre o GNV (gás natural veicular), a gasolina, o diesel e o etanol. Desta forma podemos perceber que o modelo MATRIZ é extremamente flexível para a análise de sistemas energéticos interligados, podendo estes sistemas serem tão detalhados quanto se queira. A seguir apresenta-se uma proposta de modelagem da cadeia do gás natural, dando ao leitor um exemplo da riqueza de detalhes que pode ser utilizada no MATRIZ na modelagem desta e de diversas outras cadeias.

3.2 Proposta de Modelagem da Cadeia de Gás Natural

No intuito de fornecer uma visão mais abrangente das potencialidades de aplicação deste modelo, apresenta-se nesta seção uma das possibilidades de modelagem da cadeia simplificada do gás natural no modelo MATRIZ. Nesta formulação considerou-se a integração com as cadeias simplificadas do petróleo e do biodiesel. Considerem-se então os seguintes componentes:

1. **Reservas:** uma reserva de óleo cru e outra de gás natural, independentes uma da outra, ou seja, trata-se de gás natural úmido não associado;
2. **Importação:** uma importação de óleo cru, uma de gás natural e uma para cada um dos derivados de petróleo;
3. **Formas de Energia:** na Tabela 1 a seguir descrevem-se as formas de energia definidas para a modelagem das cadeias de petróleo e gás natural:

Tabela 1. Formas de energia constantes nas cadeias de petróleo e gás natural

Primária	Secundária	Final
Óleo cru	Óleo diesel	Biodiesel
Gás natural úmido extraído	Biodiesel	Óleo combustível
Gás natural úmido	Óleo combustível	Gasolina
Gás natural úmido não aproveitado ⁽¹⁾	Gasolina	GLP
Gás natural úmido reinjetado ⁽¹⁾	GLP	Nafta
Gás natural seco	Nafta	Querosene
Gás natural seco importado ⁽²⁾	Querosene	Gás de refinaria
GNL	Gás de refinaria	Coque petróleo
LGN	Coque petróleo	Outros energéticos de petróleo
Grãos de soja	Outros energéticos de petróleo ⁽⁴⁾	Produtos não energéticos
Outras não renováveis ⁽³⁾	Produtos não energéticos ⁽⁵⁾	Eletricidade
	Eletricidade ⁽⁶⁾	Gás natural
	Eletricidade de autoprodução de petróleo ou gás natural	
	Óleo vegetal	

(1) O gás natural reinjetado e o gás natural não aproveitado são usualmente definidos no BEN (Balanço Energético Nacional) como sendo gerados em duas etapas, uma quando o gás natural é extraído, portanto úmido, e outra quando o gás natural já passou pela UPGN (Unidade de Processamento de Gás Natural) e é então classificado como gás natural seco. Na modelagem aqui proposta apenas o gás natural não aproveitado e o gás natural reinjetado na etapa de extração são considerados;

- (2) Trata-se da importação de gás natural via gasodutos, como é o caso do gás importado da Bolívia;
 - (3) Na tabela do BEN [20] denominada Consolidado (Anexos), existe uma forma de energia denominada "Outras Fontes Primárias" que inclui LGN (Líquidos de Gás Natural), Lixívia, Outras renováveis e Outras não renováveis. Na modelagem aqui proposta, LGN e Outras Não Renováveis são representadas separadamente e Lixívia e Outras renováveis são ignoradas;
 - (4) Na tabela do BEN [20] denominada Consolidado (Anexos), existe uma forma de energia denominada "Outras secundárias de petróleo" que inclui gás de refinaria, coque de petróleo e outros energéticos de petróleo, que são aqui representados separadamente;
 - (5) Na tabela do BEN [20] denominada Consolidado (Anexos), a forma de energia denominada "Produtos não energéticos" inclui asfalto, lubrificantes, solventes e outros não energéticos;
 - (6) Eletricidade disponibilizada ao sistema de distribuição.
4. **Exportações:** foram consideradas exportações de óleo cru e de cada derivado de petróleo e de gás natural;
5. **Tecnologias de transformação:** foram consideradas as seguintes tecnologias de transformação:
- (1) Extração: nesta classe foram definidas duas tecnologias, uma de extração de óleo cru e outra de gás natural;
 - (2) Produtora de energia primária renovável: foi considerada uma tecnologia de produção de soja. Ressalta-se que a capacidade instalada desta tecnologia está limitada à disponibilidade no país de área agricultável com as características de clima e solo com aptidão para o plantio de oleaginosas;
 - (3) Importação: foram definidas tecnologias de importação de óleo cru, de derivados petróleo e de gás natural;
 - (4) Transformação de energia primária para primária: nesta classe de tecnologias estão incluídos os gasodutos que levam o gás natural do poço à planta de processamento de gás natural, e as unidades de regaseificação de GNL (gás natural liquefeito);
 - (5) Transformação de energia primária para secundária: nesta classe de tecnologias estão incluídas as refinarias, as plantas de gás natural, as unidades de processamento de óleo vegetal e as usinas termelétricas a gás natural;

- (6) Transformação de energia secundária para secundária: nesta classe de tecnologia estão incluídas as centrais elétricas autoprodutoras e de serviço público utilizando o óleo combustível, as centrais elétricas autoprodutoras e de serviço público utilizando o óleo diesel e as unidades de processamento da nafta em outros derivados de petróleo;
- (7) Transformação de energia primária para final: nesta classe está incluída a tecnologia de transformação do gás natural primário seco em final (gasodutos de distribuição);
- (8) Transformação de energia secundária para final: são as tecnologias de transformação de cada derivado de petróleo ou de gás natural em formas de energia final (distribuição);
- (9) Exportação: foi considerada uma tecnologia para exportação de óleo cru e uma tecnologia de exportação para cada derivado de petróleo e de gás natural.

A Tabela 2 a seguir apresenta um sumário das tecnologias de transformação consideradas na modelagem simplificada para as cadeias do petróleo e gás natural, descrevendo as formas de energia consumidas e produzidas por cada uma delas.

Tabela 2. Tecnologias constantes nas cadeias de petróleo e gás natural

Nome	Consumo		Produção	
	Forma de energia	Nível	Forma de energia	Nível
Extração de óleo cru	Óleo cru	Reserva	Óleo cru	Primário
	Gás natural úmido extraído	Primário		
	Eletricidade	Secundário		
	Eletricidade autoprodução de petróleo e gás natural	Secundário		
Extração de gás natural	Gás natural	Reserva	Gás natural úmido extraído	Primário
			Gás natural úmido não aproveitado	Primário
			Gás natural úmido reinjetado	Primário
Produtor de soja			Grãos de soja	Primário
Importação de GNL	Importação	Importação	Gás natural liquefeito	Primário
Importação de GNS	Importação	Importação	Gás natural seco	Primário
Importação de óleo cru	Importação	Importação	Óleo cru	Primário
Importação de óleo diesel	Importação	Importação	Óleo diesel	Secundário
Importação de óleo combustível	Importação	Importação	Óleo combustível	Secundário
Importação de gasolina	Importação	Importação	Gasolina	Secundário
Importação de GLP	Importação	Importação	GLP	Secundário
Importação de	Importação	Importação	Nafta	Secundário

Nome	Consumo		Produção	
	Forma de energia	Nível	Forma de energia	Nível
Nafta				
Importação de querosene	Importação	Importação	Querosene	Secundário
Importação de coque de petróleo	Importação	Importação	Coque petróleo	Secundário
Importação de Produtos não energéticos	Importação	Importação	Produtos não energéticos	Secundário
Gasoduto 01	Gás natural úmido extraído	Primário	Gás natural úmido	Primário
			LGN	Primário
Planta de processamento de gás natural	Gás natural úmido	Primário	Gás natural seco	Primário
			GLP	Secundário
			Gasolina	Secundário
			LGN	Primário
Regaseificação	Gás natural liquefeito	Primário	Gás natural seco	Primário
Produtor de óleo vegetal	Grãos de soja	Primário	Óleo Vegetal	Secundário
Refinaria	Óleo cru	Primário	Óleo diesel	Secundário
	LGN	Primário	Óleo combustível	Secundário
	Gás natural seco	Primário	Gasolina	Secundário
	Gás natural úmido	Primário	GLP	Secundário
	Óleo combustível	Primário	Nafta	Secundário
	GLP	Secundário	Querosene	Secundário
	Eletricidade	Secundário	Gás refinaria	Secundário
	Eletricidade de autoprodução de petróleo e gás	Secundário	Coque de petróleo	Secundário
	Gás de refinaria	Secundário	Outros energéticos	Secundário
			Produtos não energéticos	Secundário
Processamento de óleo vegetal e óleo diesel	Óleo vegetal	Secundário	Biodiesel	Secundário
	Óleo diesel	Secundário	x	x
Termelétrica de autoprodução a gás natural	Gás natural seco	Primário	Eletricidade de autoprodução de petróleo ou gás natural	Secundário
Termelétrica de autoprodução óleo combustível	Óleo combustível	Secundário	Eletricidade de autoprodução de petróleo ou gás natural	Secundário
Termelétrica de autoprodução de óleo diesel	Óleo diesel	Secundário	Eletricidade de autoprodução de petróleo ou gás natural	Secundário
Termelétrica de serviço público à gás natural	Gás natural seco	Primário	Eletricidade	Secundário
Termelétrica de serviço público óleo combustível	Óleo combustível	Secundário	Eletricidade	Secundário

Nome	Consumo		Produção	
	Forma de energia	Nível	Forma de energia	Nível
Termelétrica de serviço público à óleo diesel	Óleo diesel	Secundário	Eletricidade	Secundário
Processamento de Nafta	Nafta	Secundário	Outros energéticos petróleo	Secundário
			Gasolina	Secundário
			GLP	Secundário
Distribuição de gás natural seco (gasoduto 02)	Gás natural	Primário	Gás natural	Final
Distribuição de biodiesel	Biodiesel	Secundário	Óleo diesel	Final
Distribuição de óleo combustível	Óleo combustível	Secundário	Óleo combustível	Final
Distribuição de gasolina	Gasolina	Secundário	Gasolina	Final
Distribuição de GLP	GLP	Secundário	GLP	Final
Distribuição de Nafta	Nafta	Secundário	Nafta	Final
Distribuição de querosene	Querosene	Secundário	Querosene	Final
Distribuição de outros energéticos de petróleo	Outros energéticos petróleo	Secundário	Outros energéticos petróleo	Final
Distribuição de gás de refinaria	Gás de refinaria	Secundário	Gás de refinaria	Final
Distribuição de coque de petróleo	Coque de petróleo	Secundário	Coque de petróleo	Final
Distribuição de produtos não energéticos	Produtos não energéticos	Secundário	Produtos não energéticos	Final
Exportação de óleo cru	Óleo cru	Primário	Óleo cru	Exportação
Exportação de óleo Diesel	Óleo diesel	Secundário	Óleo diesel	Exportação
Exportação de óleo combustível	Óleo combustível	Secundário	Óleo combustível	Exportação
Exportação de óleo Gasolina	Gasolina	Secundário	Gasolina	Exportação
Exportação de óleo GLP	GLP	Secundário	GLP	Exportação
Exportação de óleo Nafta	Nafta	Secundário	Nafta	Exportação
Exportação de óleo Querosene	Querosene	Secundário	Querosene	Exportação
Exportação de óleo Eletricidade	Eletricidade	Secundário	Eletricidade	Exportação
Exportação de óleo biodiesel	Biodiesel	Secundário	Biodiesel	Exportação
Exportação de óleo outros energéticos	Outros energéticos	Secundário	Outros energéticos	Exportação

Nome	Consumo		Produção	
	Forma de energia	Nível	Forma de energia	Nível
Exportação de óleo Produtos não energéticos	Produtos não energéticos	Secundário	Produtos não energéticos	Exportação

Finalmente, na página seguinte apresenta-se um diagrama esquemático da cadeia descrita. Neste diagrama é possível observar as transformações das formas de energia citadas através do consumo e da produção das tecnologias.

A seguir, são descritas de forma detalhada a modelagem matemática (função objetivo e restrições) do problema de otimização em questão. As restrições referentes à análise da operação para a condição de hidrologia crítica foram omitidas por serem similares àquelas referentes à condição de hidrologia média. Na descrição das restrições flexíveis, quando houver necessidade de explicitar se a variável de geração refere-se ao período médio ou crítico será utilizado o índice sobrescrito *med* (médio) ou *crt* (crítico).

3.3 Função Objetivo

A função objetivo consta de duas parcelas, sendo uma referente aos custos de investimento e outra aos custos de operação.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K \beta_1^k \left[\sum_{i=1, \dots, NTec} \left(CI_i^k + \sum_{j=1}^{NI} CA_j^k \cdot \varphi_{i,j} \right) \cdot x_i^k + \beta_2^k \sum_{i=1, \dots, NTec} \sum_{z=1}^{NM(i)} \sum_{\substack{l=1, \dots, L \\ sz=1, \dots, NZ}} \left(CO_{i,z}^k + \sum_{j=1}^{NP} CE_j^k \cdot \omega_{i,z,j} \right) \cdot y_{i,z}^k(l, sz) \cdot \Delta(k) \right]$$

onde:

i índice de tecnologias;

k índice de período do horizonte de planejamento;

K número total de períodos do horizonte de planejamento;

l índice de patamar de carga;

L número total de patamares de carga;

sz índice de estação;

NZ número total de estações;

z índice do modo de operação;

NM(i) número de modos de operação da tecnologia *i*.

$\Delta(k)$ número de anos no período *k*, $\Delta(0)=0$ por convenção;

β_1^k fator de atualização dos custos incorridos no primeiro ano do período *k* para o primeiro ano do primeiro período;

β_2^k fator de atualização dos custos incorridos no meio do período *k* para o primeiro ano do período *k*;

$$\beta_1^k = \prod_{i=0}^{k-1} \left[\frac{1}{1+td} \right]^{\Delta(i)}$$

$$\beta_2^k = \left(\frac{1}{1+td} \right)^{\frac{\Delta(k)}{2}}$$

td taxa de desconto anual;

$NTec$ número total de tecnologias;

CI_i^k custo unitário de expansão da capacidade da tecnologia i no período k , por unidade de energia de referência;

CA_j^k penalidade por impacto socioambiental no componente j no período k ;

$\phi_{i,j}$ coeficiente de impacto socioambiental referente ao componente síntese j da expansão da tecnologia i .

NI número de componentes síntese para análise de impactos da expansão no sistema socioambiental;

$CO_{i,z}^k$ custo de operação variável da tecnologia i , modo de operação z , no período k , por unidade de energia de referência. No caso de extrações de reservas, o modelo adiciona o custo referente ao pagamento de royalties.

CE_j^k penalidade por emissão do poluente j no período k ;

$\omega_{i,z,j}$ coeficiente de emissão do poluente j pela operação da tecnologia i no modo de operação z .

NP número de poluentes.

Quando a capacidade de uma tecnologia é investida no final do horizonte e sua vida útil ultrapassa o horizonte de planejamento, seu custo unitário de investimento será reduzido usando o fator de redução calculado pela expressão:

$$Fredução_i^k = \frac{\sum_{m=1}^{VU_i - \rho_i(k)} \left(\frac{1}{1+td} \right)^{m-1}}{\sum_{m=1}^{VU_i} \left(\frac{1}{1+td} \right)^{m-1}}$$

onde:

VU_i vida útil em anos da tecnologia i ;

$\rho_i(k)$ número de anos úteis após o horizonte de planejamento da capacidade da tecnologia i investida no período k , calculado por:

$$\rho_i(k) = \max \left\{ 0, VU_i - \sum_{m=k}^K \Delta(m) \right\}$$

3.4 Restrições de Expansão

a) Expansão total mínima e máxima em cada período k (opcional)

$$x_i^k \geq Expt_{\min}^{i,k}$$

$$x_i^k \leq Expt_{\max}^{i,k}$$

onde,

$Expt_{\max}^{i,k}$: Expansão total máxima de capacidade da tecnologia i , no período k ;

$Expt_{\min}^{i,k}$: Expansão total mínima de capacidade da tecnologia i , no período k ;

b) Expansão total mínima e máxima acumulada até o período k (opcional)

$$\sum_{\tau=1}^k x_i^\tau \geq Exp_ac_{\min}^{i,k}$$

$$\sum_{\tau=1}^k x_i^\tau \leq Exp_ac_{\max}^{i,k}$$

onde,

$Exp_ac_{\min}^{i,k}$: Expansão total mínima acumulada de capacidade da tecnologia i , até o período k ;

$Exp_ac_{\max}^{i,k}$: Expansão total máxima acumulada de capacidade da tecnologia i , até o período k .

3.5 Restrições de Operação

Considere:

$\Omega(j)$ Conjunto de tecnologias que consomem a forma de energia j ou reserva j ;

$\Psi(j)$ Conjunto de tecnologias que produzem a forma de energia j ;

$\phi(sz)$ Fração de tempo da estação sazonal sz ;

$\theta(l)$ Fração de tempo do patamar de carga l ;

EnR Conjunto das Reservas;

EnD Conjunto das Demandas;

EnG Conjunto das Formas de Energia intermediárias (primária e secundária);

a) Restrições de extração anual das reservas em cada período k (opcional)

$$\sum_{i \in \Omega(j)} y_i^k \leq Extr_{\max}^j(k)$$

$$\sum_{i \in \Omega(j)} y_i^k \geq Extr_{\min}^j(k)$$

$$\forall j \in EnR, \forall k$$

onde:

$$y_i^k = \sum_{\substack{l=1, \dots, L \\ sz=1, \dots, NZ}} y_i^k(l, sz)$$

$Extr_{\min}^j(k)$: Extração mínima anual da reserva j no período k ;

$Extr_{\max}^j(k)$: Extração máxima anual da reserva j no período k .

b) Restrições de extração acumulada até o período k inclusive (opcional)

$$\sum_{p=1}^k \sum_{i \in \Omega(j)} y_i^p \Delta(p) \geq ExtrT_{\min}^j(k)$$

$$\sum_{p=1}^k \sum_{i \in \Omega(j)} y_i^p \Delta(p) \leq ExtrT_{\max}^j(k)$$

$\forall j \in EnR, \forall k$

$ExtrT_{\min}^j(k)$: Extração mínima da reserva j acumulada até o período k inclusive;

$ExtrT_{\max}^j(k)$: Extração máxima da reserva j acumulada até o período k inclusive.

c) Extração total limitada ao volume disponível no ano Base (automática)

$$\sum_{p=1}^K \sum_{i \in \Omega(j)} y_i^p \Delta(p) \leq [Vol_{AB}(j) - (AnoI - AnoB) \cdot Extr_{AB}(j)], \forall j \in EnR$$

onde:

$AnoB$ Ano Base do estudo;

$AnoI$ Ano de Início do estudo, geralmente diferente do ano Base;

$Vol_{AB}(j)$ Energia total disponível na reserva j no ano Base;

$Extr_{AB}(j)$ Equivalente energético da extração na reserva j no ano Base;

d) Balanços de energias intermediárias em cada patamar de carga l e estação sz do período k (automático)

Em cada patamar de carga e estação sz do período k , a soma dos montantes da forma de energia j produzidos pelas tecnologias em $\Psi(j)$ é maior ou igual a soma dos montantes da forma de energia j consumidos pelas tecnologias em $\Omega(j)$.

$$\sum_{i \in \Psi(j)} \sum_{z=1}^{NM(i)} \eta_{i,z,j}^k \cdot y_{i,z}^k(l,sz) - \sum_{i \in \Omega(j)} \sum_{z=1}^{NM(i)} \eta_{i,z,j}^k \cdot y_{i,z}^k(l,sz) \geq 0$$

$\forall j \in EnG, \forall k, \forall l, \forall sz$

onde:

$\eta_{i,z,j}^k$ Coeficiente da tecnologia i no modo de operação z e período k , para produção ou consumo da energia j . A possibilidade de variação deste coeficiente ao longo dos períodos representa a modelagem de safras de tecnologias, conhecida em modelos de matriz energética como *Vintage*.

No caso de energias primárias ou secundárias sem tecnologias ou demandas a jusante ou montante com comportamento sazonal e patamares de carga, o balanço é apenas por período³, utilizando-se a expressão:

$$\sum_{i \in \Psi(j)} \sum_{z=1}^{NM(i)} \eta_{i,z,j}^k \cdot y_{i,z}^k - \sum_{i \in \Omega(j)} \sum_{z=1}^{NM(i)} \eta_{i,z,j}^k \cdot y_{i,z}^k \geq 0, \quad \forall j \in EnG, \quad \forall k$$

onde:

$$y_{i,z}^k = \sum_{l=1, \dots, L} \sum_{sz=1, \dots, NZ} y_{i,z}^k(l, sz)$$

Para o caso exemplo ilustrado na Figura 8, os balanços são feitos para as formas de energia “carvão metalúrgico” e “carvão vapor”, do nível primário, e para as formas de energia “eletricidade”, “alcatrão”, “gás de coqueria” e “coque” do nível secundário. Por exemplo, a soma dos valores de extração e importação de carvão metalúrgico deve ser maior ou igual ao consumo do mesmo pela coqueria.

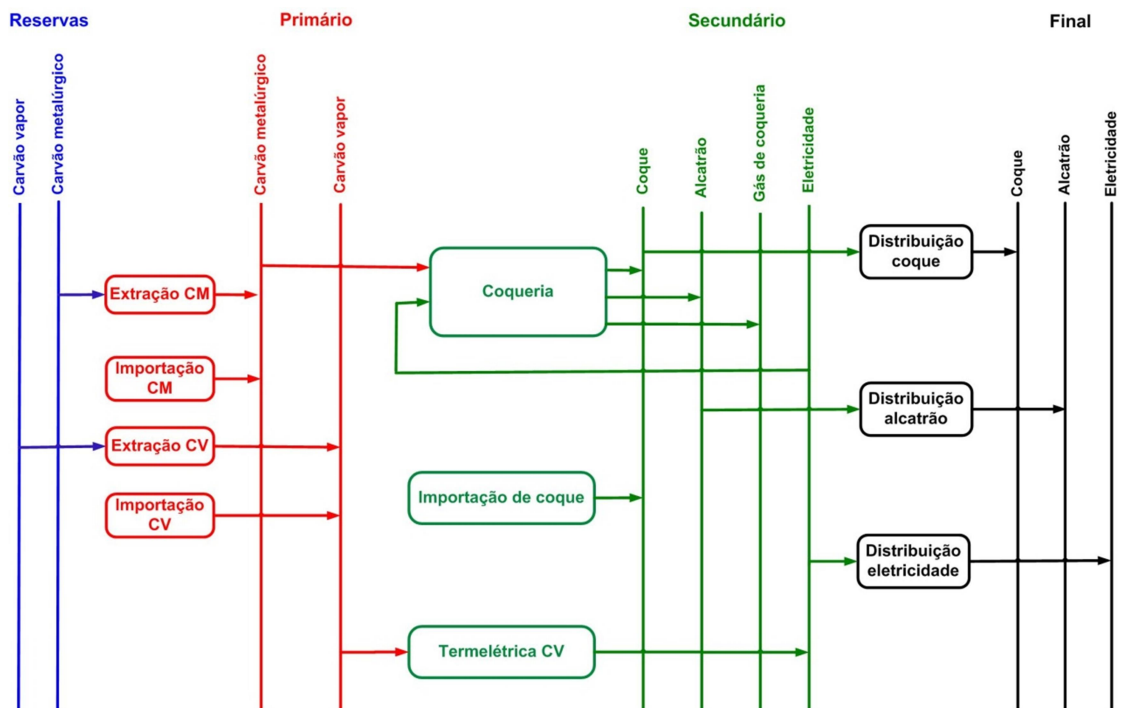


Figura 8. Cadeia simplificada do carvão

³ A implementação atual faz os balanços de cada patamar l , estação sazonal sz , para todas as formas de energia.

e) Balanço de demanda por patamar de carga l e estação sz do período k (automático)

$$\sum_{i \in \Psi(j)} \sum_{z=1}^{NM(i)} \eta_{i,z}^k \cdot y_{i,z}^k(l, sz) \geq Dem_j^k \cdot \theta(sz) \cdot \phi(l) \cdot FS_j(sz) \cdot FP_j(l)$$

$$\forall j \in EnD, \forall k, \forall l, \forall sz$$

onde:

Dem_j^k Quantidade de energia j demandada num ano do período k ;

$FS_j(sz)$ Fator de variação sazonal da demanda da energia j na estação sz ;

$FP_j(l)$ Fator de variação de patamar da demanda da energia j no patamar de carga l ;

Quando a demanda e a cadeia a montante da demanda não apresentar sazonalidade ou patamares de carga, o balanço de atendimento é feito apenas por período⁴ usando-se:

$$\sum_{i \in \Psi(j)} \sum_{z=1}^{NM(i)} \eta_{i,z}^k \cdot y_{i,z}^k \geq Dem_j^k$$

$$\forall j \in EnD, \forall k$$

f) Limites mínimo e máximo da operação de cada tecnologia i associados a sua capacidade disponível, em cada patamar l , estação sz e período k (automático)

Em cada patamar l , estação sz e período k , a operação de cada tecnologia i estará limitada superiormente e inferiormente a proporções da capacidade instalada disponível no período k inclusive Y_i^k . Esta capacidade é calculada considerando-se a vida útil da tecnologia i , as capacidades históricas e as expansões, através da expressão:

$$Y_i^k = \sum_{h=1}^H CapEx_i^h \cdot IND_i^h(k) + \sum_{\tau=1}^k x_i^\tau \cdot IND_i^e(\tau, k)$$

onde:

⁴ A implementação atual faz os balanços de cada patamar l , estação sazonal sz , para todas as demandas.

$CapEx_i^h$ Capacidade existente no ano Base da tecnologia i construída no ano $Anoh$;

H Número de categorias quanto à idade das unidades existentes no ano Base da tecnologia i ;

$IND_i^h(k)$ Indicador para o período k da disponibilidade ou não da capacidade existente construída no ano $Anoh$ da tecnologia i , sendo calculado por:

$$IND_i^h(k) = 0 \quad \text{se} \quad \sum_{\lambda=1}^k \Delta(\lambda) > VU_i - (Ano_h - AnoI), \quad \text{caso contrário, } IND_i^h(k) = 1$$

$IND_i^e(\tau, k)$ Indicador para o período k da disponibilidade ou não da capacidade expandida no período τ da tecnologia i , sendo calculado por:

$$IND_i^e(\tau, k) = 0 \quad \text{se} \quad \sum_{\lambda=\tau}^{k-1} \Delta(\lambda) > VU_i, \quad \text{caso contrário, } IND_i^e(\tau, k) = 1$$

As restrições operativas ficam então:

- Para tecnologias com perfil sazonal de operação

$$\sum_{z=1}^{NM(i)} \delta_{i,z} \cdot y_{i,z}^k(l, sz) \leq Y_i^k \cdot Fc_{\max}^{i,k} \cdot \theta(sz) \cdot \phi(l) \cdot FCH_M^{i,k} \cdot FTS_i(sz) \cdot FTP_i(l)$$

$$\sum_{z=1}^{NM(i)} \delta_{i,z} \cdot y_{i,z}^k(l, sz) \geq Y_i^k \cdot Fc_{\min}^{i,k} \cdot \theta(sz) \cdot \phi(l)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, NTec\}, \forall k, \forall l, \forall sz$$

onde:

$Fc_{\max}^{i,k}$ fator de capacidade máximo da tecnologia i no período k ;

$Fc_{\min}^{i,k}$ fator de carga mínimo da tecnologia i do período k ;

$FCH_M^{i,k}$ fator de capacidade para a condição de hidrologia média da tecnologia i no período k (apenas para tecnologias de geração de eletricidade, para as demais este fator deve ser igual a 1);

$FTP_i(l)$ fator de variação da capacidade da tecnologia para o patamar l ;

$FTS_i(sz)$ fator de variação da operação com relação ao valor médio da tecnologia para a estação sz ;

$\delta_{i,z}$ coeficiente que relaciona a capacidade da tecnologia i no modo de operação z com a capacidade da tecnologia que é definida para o primeiro modo de operação.

- Para tecnologias sem perfil sazonal de operação

$$\sum_{z=1}^{NM(i)} \delta_{i,z} \cdot y_{i,z}^k(l, sz) \leq Y_i^k \cdot Fc_{\max}^{i,k} \cdot \theta(sz) \cdot \phi(l)$$

$$\sum_{z=1}^{NM(i)} \delta_{i,z} \cdot y_{i,z}^k(l, sz) \geq Y_i^k \cdot Fc_{\min}^{i,k} \cdot \theta(sz) \cdot \phi(l)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, NTec\}, \forall k, \forall l, \forall sz$$

Esta distinção entre tecnologias com e sem variação sazonal é necessária para permitir que as termelétricas sem variação sazonal possam gerar até seu limite máximo operativo em qualquer das estações, desde que a soma da operação ao longo das estações do ano seja igual à sua capacidade máxima em condição de hidrologia média (restrição g)

g) Limite máximo anual da operação de cada tecnologia i

$$\sum_{\substack{sz=1, \dots, NZ \\ l=1, \dots, L}} \sum_{z=1}^{NM(i)} \delta_{i,z} \cdot y_{i,z}^k(l, sz) \leq Y_i^k \cdot Fc_{\max}^{i,k} \cdot FCH_M^{i,k}$$

h) Limites mínimo e máximo anuais da operação de cada tecnologia i , modo de operação z , em cada período k (opcional)

$$y_{i,z}^k \leq Oper_{\max}^{i,z}(k)$$

$$y_{i,z}^k \geq Oper_{\min}^{i,z}(k)$$

onde:

$Oper_{\min}^{i,z}(k)$ Operação mínima anual da tecnologia i no período k , modo de operação z , em termos de quantidade da energia de referência modo de operação z ;

$Oper_{\max}^{i,z}(k)$ Operação máxima anual da tecnologia i no período k , modo de operação z , em termos de quantidade da energia de referência do modo de operação z .

3.6 Restrições Flexíveis

Além destes conjuntos de restrições de expansão e de operação que já fazem parte do problema de programação matemática implementado no MATRIZ, existem também um terceiro tipo de restrições chamadas de flexíveis, denominado desta forma porque são introduzidas no problema pelo próprio usuário. Neste tipo de restrições utiliza-se o conceito de grupos de tecnologias que podem ser definidos como conjuntos compostos por tecnologias com uma determinada característica em comum, tais como: grupo das usinas hidrelétricas, grupos das refinarias, grupos das tecnologias renováveis etc. A seguir são apresentados alguns tipos de restrições flexíveis mais comumente utilizados.

Considere:

G_j j -ésimo Grupo de Tecnologias;

$\Gamma(j)$ Conjunto de Grupos de Tecnologias que contém a tecnologia i ;

Ne_p^i Número de formas de energia produzidas pela tecnologia i ;

3.6.1 Restrições de Expansão da Capacidade

Neste item são apresentadas diversas restrições relativas à expansão da capacidade das tecnologias, como, taxas de expansão (anuais/acumuladas) ou limites máximos de expansão (anuais/acumulados) de tecnologias específicas ou um grupo destas.

As restrições que limitam a expansão anual evitam que aconteça uma expansão muito grande em um certo período de uma certa tecnologia ou grupo destas. As restrições que limitam a expansão acumulada asseguram valores de capacidade instalada em cada período. Finalmente, as restrições de taxas de expansão anual, de um período ao outro, evitam que toda a capacidade disponível para expansão seja instalada de uma única vez em um único período.

a) Limites de expansão anual por tecnologia

Limites mínimo (L_{\min}) e máximo (L_{\max}) de expansão anual de uma tecnologia i . Considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k as desigualdades:

$$L_{\min} \leq x_i^k \leq L_{\max}$$

b) Limites de expansão acumulada por tecnologia

Limites mínimo (L_{\min}^{ac}) e máximo (L_{\max}^{ac}) de expansão acumulada de uma tecnologia i . Considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k a equação:

$$L_{\min}^{ac} \leq \sum_{t=1}^k x_i^t \leq L_{\max}^{ac}$$

c) Limites de expansão anual por grupo

Limites mínimo (L_{\min}^G) e máximo (L_{\max}^G) de expansão anual de um grupo de tecnologias. Seja G_j um grupo de tecnologias, considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k a equação:

$$L_{\min}^G \leq \sum_{i \in G_j} x_i^k \leq L_{\max}^G$$

d) Limites de expansão acumulada por grupo

Limites mínimo (L_{\min}^{G-ac}) e máximo (L_{\max}^{G-ac}) de expansão acumulada de um grupo de tecnologias. Seja G_j um grupo de tecnologias, considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k a equação:

$$L_{\min}^{G-ac} \leq \sum_{i \in G_j} \sum_{t=1}^k x_i^t \leq L_{\max}^{G-ac}$$

e) Variação de expansão anual por tecnologia

Variação máxima (V_{\max}) de expansão anual de uma tecnologia i . Considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k a equação:

$$\left| x_i^k - x_i^{k-1} \right| \leq V_{\max}$$

$$\boxed{-V_{\max} \leq x_i^k - x_i^{k-1} \leq V_{\max}}$$

f) Variação de expansão anual por grupo

Variação máxima (V_{\max}^G) de expansão anual de um grupo de tecnologias. Seja G_j um grupo de tecnologias, considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k a equação:

$$\left| \sum_{i \in G_j} x_i^k - \sum_{i \in G_j} x_i^{k-1} \right| \leq V_{\max}^G$$

$$\boxed{-V_{\max}^G \leq \sum_{i \in G_j} x_i^k - \sum_{i \in G_j} x_i^{k-1} \leq V_{\max}^G}$$

3.6.2 Restrições de Limites Operativos

Neste item são apresentadas diversas restrições relativas à operação de tecnologias específicas ou um grupo destas, tais como limites de geração anual ou acumulados.

a) Limites de geração anual por tecnologia

Limite mínimo (Fz_{\min}) e máximo (Fz_{\max}) de geração anual de uma tecnologia operando no modo de operação z , em condição de hidrologia média e crítica. Considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k , a equação:

$$Fz_{\min} \leq \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L y_{i,z}^{k,med}(l,sz) \leq Fz_{\max}$$

$$Fz_{\min} \leq \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L y_{i,z}^{k,crt}(l,sz) \leq Fz_{\max}$$

b) Limites de geração acumulada por tecnologia

Limite mínimo (Fz_{\min}^{ac}) e máximo (Fz_{\max}^{ac}) de geração acumulada de uma tecnologia operando no modo de operação z , em condição de hidrologia média e crítica. Considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k , a equação:

$$Fz_{\min}^{ac} \leq \sum_{t=1}^k \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L y_{i,z}^{t,med}(l,sz) \leq Fz_{\max}^{ac}$$

$$Fz_{\min}^{ac} \leq \sum_{t=1}^k \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L y_{i,z}^{t,crt}(l,sz) \leq Fz_{\max}^{ac}$$

c) Limites de geração anual por grupo

Limite mínimo (Fz_{\min}^G) e máximo (Fz_{\max}^G) de geração anual de um grupo de tecnologias operando no modo de operação z , em condição de hidrologia média e crítica. Seja G_j um grupo de tecnologias, considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k , a equação:

$$Fz_{\min}^G \leq \sum_{i \in G_j} \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L y_{i,z}^{k,med}(l,sz) \leq Fz_{\max}^G$$

$$Fz_{\min}^G \leq \sum_{i \in G_j} \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L y_{i,z}^{k,crt}(l,sz) \leq Fz_{\max}^G$$

d) Limites de geração acumulada por grupo

Limite mínimo (Fz_{\min}^{G-ac}) e máximo (Fz_{\max}^{G-ac}) de geração acumulada de um grupo de tecnologias operando no modo de operação z , em condição de hidrologia média e crítica. Seja G_j um grupo de tecnologias, considerando todo o horizonte de planejamento, tem-se para cada período k , a equação:

$$Fz_{\min}^{G-ac} \leq \sum_{i \in G_j} \sum_{t=1}^k \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L y_{i,z}^{t,med}(l,sz) \leq Fz_{\max}^{G-ac}$$

$$Fz_{\min}^{G-ac} \leq \sum_{i \in G_j} \sum_{t=1}^k \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L y_{i,z}^{t,crt}(l,sz) \leq Fz_{\max}^{G-ac}$$

3.6.3 Restrições de Participação na Matriz Energética

Neste item são apresentadas algumas restrições que condicionam a participação de uma dada tecnologia (ou grupos de tecnologias) na matriz energética ao final do horizonte ou em períodos específicos.

a) Participação de renováveis

Participação mínima de fontes renováveis de geração de energia elétrica ao final do horizonte de planejamento. Considere, G_R o grupo de tecnologias renováveis (hidrelétricas, eólicas, solar

fotovoltaica, solar e biomassa), e G_E o grupo de eletricidade total, ou seja, todos os tipos de tecnologias de geração de energia elétrica, incluindo as renováveis. Defina-se $\beta \in [0,1]$ a participação total requerida ao final do horizonte, tem-se então:

$$\sum_{i \in G_R} \sum_{t=1}^K x_i^t \geq \beta \cdot \sum_{i \in G_E} \sum_{t=1}^K x_i^t$$

b) Participação de energia nuclear

Participação mínima de tecnologias de geração de energia nuclear na expansão acumulada do sistema elétrico nos θ últimos períodos do horizonte de planejamento. Considere, G_{NUC} o grupo de tecnologias nucleares (usinas nucleares), e G_E o grupo de eletricidade total, ou seja, todos os tipos de tecnologias de geração de energia elétrica, incluindo as nucleares. Defina-se $\beta \in [0,1]$ a participação requerida, tem-se:

$$\sum_{i \in G_{NUC}} \sum_{t=K-\theta}^K x_i^t \geq \beta \cdot \sum_{i \in G_E} \sum_{t=K-\theta}^K x_i^t$$

3.6.4 Restrições de Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE)

Estas restrições impõem limites máximos de emissões de gases poluentes (anuais ou acumuladas ao longo do horizonte) por tecnologia (ou grupos de tecnologias). Defina-se, G_{GEE} o grupo de tecnologias emissoras destes poluentes, tais como, tecnologias que representam usinas termelétricas movidas a gás natural, carvão, óleo diesel e óleo combustível, e F_{GEE}^i o fator que converte para MtCO₂Eq (Milhões de Toneladas de CO₂ Equivalente) a produção em tep (Tonelada Equivalente de Petróleo) de uma tecnologia emissora i . As seguintes restrições podem ser modeladas:

a) Limites anuais de emissões

Limite máximo de emissões anuais de Gases do Efeito Estufa (GEE), no setor elétrico em condição de hidrologia média. Seja L_{GEE}^k o limite máximo de emissão, dado em MtCO₂Eq, no período k ;

$$\sum_{i \in G_{GEE}} \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L \sum_{z=1}^{NM(i)} F_{GEE}^i \cdot y_{i,z}^{k,med}(l,sz) \leq L_{GEE}^k$$

b) Limite acumulado de emissões

Limite máximo de emissões acumuladas de Gases do Efeito Estufa (GEE), no setor elétrico em condição de hidrologia média. Seja L_{GEE}^{ac} o limite máximo de emissão acumulada ao longo de todo horizonte de planejamento, dado em MtCO₂Eq;

$$\sum_{i \in G_{GEE}} \sum_{t=1}^K \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L \sum_{z=1}^{NM(i)} F_{GEE}^i \cdot y_{i,z}^{t,med}(l,sz) \leq L_{GEE}^{ac}$$

Restrições análogas podem ser derivadas para o setor de transportes, ao invés do setor elétrico. Considerando G_{GEE}^T o grupo de tecnologias emissoras de gases do efeito estufa, pertencentes ao setor de transportes, como por exemplo, transportes movidos à gasolina ou diesel (carros de passeio, vans, ônibus, caminhões), o mesmo raciocínio pode ser feito para o limite de emissões.

3.6.5 Restrição de Segurança Energética em Derivados de Petróleo

Este tipo de restrição limita a quantidade máxima de derivados de petróleo importados, ou seja, aqueles não produzidos pelas tecnologias de refino de petróleo disponíveis no país. Considere G_{REF} e P_{REF} , o grupo de tecnologias de refino de petróleo e a quantidade total de derivados produzida, respectivamente. Considere G_{IMP}^{PET} e P_{IMP}^{PET} , o grupo de tecnologias de importação de derivados de petróleo e a quantidade total de derivados importados, respectivamente. Para as tecnologias de refino adota-se como energia de referência o óleo cru consumido pela refinaria na produção dos seus derivados. Para as tecnologias de importação de derivados a energia de referência é a quantidade importada, ou seja, produção das tecnologias. Defina-se $\beta \in [0,1]$ o percentual máximo permitido ao final do horizonte, tem-se então:

$$P_{REF} = \sum_{i \in G_{REF}} \sum_{t=1}^K \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L \sum_{z=1}^{NM(i)} \sum_{j=1}^{Ne_p^i} \eta_{i,z,j}^t \cdot y_{i,z}^{t,med}(l,sz)$$

$$P_{IMP}^{PET} = \sum_{i \in G_{IMP}^{PET}} \sum_{t=1}^K \sum_{sz=1}^{SZ} \sum_{l=1}^L \sum_{z=1}^{NM(i)} y_{i,z}^{y,med}(l,sz)$$

$$P_{IMP}^{PET} \leq \beta \cdot (P_{IMP}^{PET} + P_{REF})$$

$$\boxed{(1 - \beta) \cdot P_{IMP}^{PET} \leq \beta \cdot P_{REF}}$$

Esta restrição obriga que a quantidade total de derivados importados na matriz energética P_{IMP}^{PET} seja no máximo um percentual definido do total de derivados disponíveis, que seria o próprio P_{IMP}^{PET} acrescido de toda a produção de derivados nas refinarias do país P_{REF} .

4 Caso exemplo simplificado

O projeto de desenvolvimento do modelo de projeção de matriz energética, MATRIZ, foi estruturado em etapas, sendo a primeira delas o desenvolvimento e implementação de uma formulação matemática capaz de representar o problema da expansão de sistemas energéticos integrados. Como nesta primeira etapa o objetivo principal era desenvolver e testar o modelo, procurou-se desenvolver um caso teste simples, sem, no entanto, deixar de representar processos de transformação de energia. O caso teste refere-se à cadeia do carvão e lenha do sistema energético brasileiro e foi baseada fundamentalmente no Balanço Energético Nacional 2006 [20].

4.1 Estrutura das Cadeias do Carvão e da Lenha

No MATRIZ, uma cadeia energética é estruturada em reservas, importações, níveis de energia e suas formas de energia, demandas e exportações. Posteriormente, são detalhadas as tecnologias de transformação de energia.

Para o caso teste, a cadeia de carvão do sistema energético brasileiro foi estruturada com duas reservas primárias de carvão, uma de carvão metalúrgico e outra de carvão energético. Esta simplificação é razoável tendo em vista que as reservas nacionais estão concentradas no sul do país. Em termos de importação, considerou-se a importação de carvão metalúrgico, coque e carvão a vapor. Para níveis de energia, foram considerados os níveis primário, secundário e final.

Na Tabela 3 a seguir estão descritas as formas de energia definidas nestes três níveis para as cadeias do carvão e da lenha.

Tabela 3. Formas de Energia das Cadeias do Carvão e da Lenha

Primária	Secundária	Final
Carvão Importado	Eletricidade	Eletricidade
Carvão vapor	Coque	Coque
Carvão metalúrgico	Gás de coqueria	Gás de coqueria
Lenha	Alcatrão	Alcatrão
	Carvão vegetal	Carvão metalúrgico
	Eletricidade a alcatrão	Carvão vapor
	Eletricidade a gás de coqueria	Carvão vegetal
	Eletricidade a carvão vapor	Lenha
		Eletricidade a lenha

Cada forma de energia final foi considerada como uma demanda exógena. Consideraram-se ainda uma exportação de coque e uma de carvão vegetal.

Definidas as formas de energia, são então detalhadas as tecnologias de transformação de energia, que para melhor entendimento, foram agrupadas em classes. Para a cadeia do carvão, as classes consideradas são descritas a seguir:

- Extração, nesta classe foram definidas duas tecnologias, uma de extração de carvão vapor e outra de carvão metalúrgico, denominadas de Ext_CMet e Ext_Cvapor, respectivamente;
- Importação, foram definidas tecnologias de importação de carvão metalúrgico, carvão vapor e coque, denominadas de CImp_CMet, Cimp_Cvap, Cimp_coque, respectivamente, e uma tecnologia denominada Importador, que permite a importação através das tecnologias de importação anteriormente citadas;
- Transformação de energia primária para secundária: nesta classe de tecnologia estão incluídas uma usina termelétrica utilizando carvão importado (Term_CImp), duas utilizando carvão vapor extraído das reservas nacionais, uma delas representando as centrais elétricas de serviço público a carvão vapor (Term_Cvap) e outra representando as centrais elétricas autoprodutoras (Term_autopr_Cvap);
- Transformação de energia secundária para secundária: nesta classe de tecnologia estão incluídas as usinas termelétricas, representando as centrais elétricas autoprodutoras utilizando o gás de coqueria ou alcatrão, denominadas Term_autop_gascoq e Term_autop_alcat, respectivamente;
- Transformação de energia primária para final: nesta classe estão incluídas a tecnologia de transformação do carvão metalúrgico primário em final, denominada CMet_PF, a de carvão vapor primário em final, denominada CVap_PF;
- Transformação de energia secundária para final: são as tecnologias de transformação do coque secundário em final (Coque_SF), do gás de coqueria secundário em gás de coqueria final (Gás_coq_SF), e da eletricidade secundária em final (Eletr_SF);
- Exportação: foi considerada uma tecnologia para exportação do coque (Coque_SE).

Com relação à cadeia da lenha, as tecnologias são detalhadas por classe a seguir:

- importação, foi considerada uma tecnologia de importação de carvão vegetal, denominada CImp_Cveg;
- produtora de energia primária renovável, foi considerada uma tecnologia de produção de lenha, denominada Madreira;
- transformação de energia primária para secundária: nesta classe de tecnologia estão incluídas as carvoarias e uma central elétrica autoprodutora utilizando a lenha (Term_autop_lenha);
- transformação de energia primária para final: inclui a tecnologia de transformação da lenha primária em final, denominada Lenha _PF;

- transformação de energia secundária para final: consiste na tecnologia de transformação do carvão vegetal secundário em final, denominada CVeg_SF;
- exportação: foi considerada uma tecnologia para exportação do carvão vegetal (Cveg_SE).

A Tabela 4 a seguir apresenta um sumário das tecnologias de transformação consideradas para as cadeias do carvão e da lenha, respectivamente, descrevendo as formas de energia consumidas e produzidas por cada uma delas (e seus correspondentes níveis de energia).

Tabela 4. Tecnologias das cadeias do carvão e da lenha.

Nome	Consumo		Produção	
	Forma de energia	Nível	Forma de energia	Nível
Ext_Cvapor	Carvão vapor (energético)	Reserva	Carvão vapor	Primário
	Eletricidade a carvão vapor	Secundário	x	x
Ext_CMet	Carvão metalúrgico	Reserva	Carvão metalúrgico	Primário
Madereira	x	x	Lenha	Primário
Importador	x	x	Importação	Importação
Imp_CMet	Importação	Importação	Carvão metalúrgico	Primário
Imp_CVeg	Importação	Importação	Carvão vegetal	Secundário
Imp_CVapor	Importação	Importação	Carvão vapor importado	Primário
Imp_Coque	Importação	Importação	Coque	Secundário
Term_CImp	Carvão vapor importado	Primário	Eletricidade	Secundário
Term_Cvap	Carvão vapor	Primário	Eletricidade	Secundário
Term_autop_Cvap	Carvão vapor	Primário	Eletricidade a carvão vapor	Secundário
Coqueria	Carvão metalúrgico	Primário	Coque	Secundário
	Eletricidade a gás de coqueria	Secundário	Gás de coqueria	Secundário

	Eletricidade a alcatrão	Secundário	Alcatrão	Secundário
	Gás de coqueria	Secundário	x	x
Carvoaria_PS	Lenha	Primário	Carvão vegetal	Secundário
CVap_PF	Carvão vapor	Primário	Carvão vapor	Final
Lenha_PF	Lenha	Primário	Lenha	Final
Term_autop_gascoq	Gás coqueria	Secundário	Eletricidade de gás de coqueria	Secundário
Term_autop_alcat	Alcatrão	Secundário	Eletricidade a alcatrão	Secundário
Term_autop_lenha	Lenha	Primário	Eletricidade a lenha	Secundário
CMet_PF	Carvão metalúrgico	Primário	Carvão metalúrgico	Final
Carv_veg_SF	Carvão vegetal	Secundário	Carvão vegetal	Final
Elec_SF	Eletricidade	Secundário	Eletricidade	Final
Alcatrão_SF	Alcatrão	Secundário	Alcatrão	Final
Coque_SF	Coque	Secundário	Coque	Final
Gás_coq_SF	Gás coqueria	Secundário	Gás coqueria	Final
Coque_SE	Coque	Secundário	Coque	Exportação
Cveg_SE	Carvão vegetal	Secundário	Carvão vegetal	Exportação

As cadeias completas do carvão e da lenha estão ilustradas no diagrama do Apêndice A.

4.2 Dados

O arquivo de dados do MATRIZ é composto pelos conjuntos de dados gerais, reservas, curvas típicas de variação diurna e sazonal, demandas e tecnologias. Os principais dados foram extraídos do Balanço Energético Nacional 2006 [20].

4.2.1 Dados Gerais

O horizonte de planejamento considerado foi de 25 anos, iniciando em 2008, considerando períodos de análise de mesma duração de 5 anos. Foi escolhido como ano base o ano de 2005 e uma taxa de desconto de 8%, valor adotado nas simulações do MELP para o Plano Nacional de Energia 2030 [17]. Não foram representadas as questões relativas aos impactos socioambientais e emissão de poluentes.

4.2.2 Dados das Reservas

De acordo com a Tabela 6.4 [20] as reservas de carvão vapor e metalúrgico em 31 de dezembro de 2005 eram de 27.187 e 5.149 toneladas, respectivamente. Usando os fatores de conversão de toneladas para tep descritos em sua Tabela E.10 [20], que são 0,35 para o carvão vapor 3700 Kcal/Kg e 0,642 para o carvão metalúrgico nacional, pode-se obter um fator 0,554 que converte toneladas de carvão metalúrgico em toneladas equivalentes de carvão vapor 3700 Kcal/Kg. Posteriormente, com base na Tabela 6.1 [20], que indica uma reserva total de carvão de 2.756,2 milhões de tep, obtém-se um fator de conversão de toneladas para tep igual a 0,136, que aplicado aos valores das reservas dados em toneladas, resulta em montantes de reserva de carvão metalúrgico e vapor iguais a 702 e 2054 milhões de tep, respectivamente.

4.2.3 Dados de Curvas Típicas de Variação Diurna e Sazonal

Não foram consideradas variações diurnas ou sazonais na demanda ou nos fatores de capacidade das tecnologias.

4.2.4 Dados de Demandas

Adotando como referência as demandas verificadas no ano de 2005 (Tabela Consolidado 2005 [20]) e assumindo, como exemplo, um crescimento médio anual de 2%, são obtidas as projeções das demandas para os quinquênios do horizonte de planejamento considerado, descritas na Tabela 5.

Tabela 5. Projeções das demandas de energia

Demanda	2005	2008-13	2013-18	2018-23	2023-28	2028-33
Alcatrão	197	228	291	371	474	605
Eletricidade	525	612	788	1017	1399	1685
Eletricidade a lenha	53	60	73	88	107	131
Gás coqueria	1016	1176	1501	1916	2445	3121
Coque	6420	7432	9485	12106	15450	19719
Carvão metal.	3178	3679	4695	5993	7648	9761
Carvão vapor	341	395	504	643	821	1047
Lenha	16119	18660	23815	30395	38792	49510
Carvão veg.	6248	7233	9231	11782	15037	19191
Exp. C. veg	10	12	15	19	24	31
Exp. Coque	1	1	1	2	2	3

4.2.5 Coeficientes Técnicos das Tecnologias

Conforme descrito no Manual de Metodologia do modelo MATRIZ, para cada tecnologia devem ser definidos a energia de referência e os coeficientes das formas de energia consumidas e produzidas com relação à energia de referência. Com base nos balanços energéticos de 1980 a 2005 constantes no BEN 2006, foram calculados, para cada ano deste período, os coeficientes técnicos das tecnologias das cadeias de carvão e da lenha ilustrados nos gráficos do Apêndice B. Nesta aplicação, são utilizados os coeficientes técnicos referente ao balanço do ano de 2005 descritos a seguir.

a) Extrações

A tecnologia de extração carvão metalúrgico foi modelada sem consumo de energia e a de extração de carvão vapor como consumindo energia elétrica produzida pelo carvão vapor. A Tabela 6 a seguir descreve os montantes consumidos e produzidos por estas tecnologias em 2005 [20].

Tabela 6. Dados de extrações

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Extr_CMet	x	x	x	CMet	Primário	135 (**)
Extr_CVapor	Eletricidade a carvão vapor	Secundário	21,07 (*)	Cvapor	Primário	2348(**)

(*) Produção de eletricidade da autoprodutora a carvão, Tabela 5.4 [20] (21.07 x 10³ tep = 245 GWh*0.086)

(**) Produções de carvão vapor e carvão metalúrgico obtidos da Tabela 2.4 e 2.5 [20], respectivamente, multiplicados pelos fatores de conversão para tep, ou alternativamente, obtidos da Tabela Consolidado 2005 [20].

Considerando o carvão extraído como energia de referência, os coeficientes destas tecnologias são descritos na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7. Coeficientes das extrações

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Coeficiente	Forma de energia produzida	Nível de energia	Coeficiente
Extr_CMet	x	x	x	CMet	Primário	1
Extr_CVapor	Eletricidade a carvão vapor	Secundário	0,009	Cvapor	Primário	1

b) Importações

Estas tecnologias, assim como as de extração, são modeladas como tecnologias sem consumo de forma de energia e produzindo apenas uma forma de energia, portanto, seus coeficientes são unitários. A Tabela 8 a seguir descreve os montantes importados em 2005 (Tabela 4.3 [20]).

Tabela 8. Dados de importações

Tecnologia	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
CImp_CMet	CMet	Primário	10137
Cimp_Cvapor	CVapor_Imp	Primário	0
Imp_Coque	Coque	Secundário	1202
CImp_Cveg	CVeg	Secundário	58

c) Transformações de energia primária para secundária

c.1) Coquerias

Na cadeia de carvão, a coqueria é a tecnologia mais complexa, visto que possui várias formas de energia de consumo e de produção. Ela consome carvão metalúrgico, gás de coqueria, eletricidade a alcatrão e eletricidade a gás de coqueria, e produz coque, alcatrão e gás de coqueria, conforme ilustrado na Figura 9 a seguir.

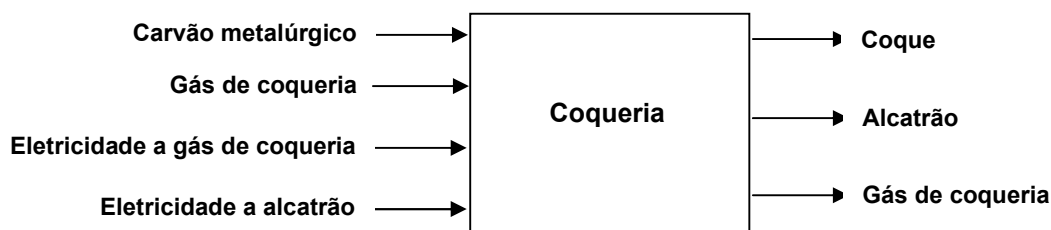


Figura 9. Diagrama esquemático da coqueria

Com base nas Tabelas 5.4 e 5.5 [20], os dados referentes às formas de energia consumidas e produzidas pelas coquerias são descritos na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9. Dados de Coqueria

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Coqueria	Carvão metal.	Primário	7173	Coque	Secundário	5363

	Gás de coqueria (*)	Secundário	312	Gás de coqueria	Secundário	1467
	Eletricidade a alcatrão	Secundário	4,5 (**)	Alcatrão	Secundário	221
	Eletricidade a gás de coqueria	Secundário	38,7 (***)	x	x	x

(*) Consumo final de gás de coqueria do setor energético (Tabela Consolidado 2005 [20])

(**) Consumo final de gás de alcatrão para produção de eletricidade,

$4,5 \times 10^3 \text{ tep} = 13 \times 10^3 \text{ tep} * (1127 \text{ GWh} * 0.086 / 282)$ (Tabela Consolidado 2005 e Tabela 5.4 [20])

(***) Produção de autoprodução a gás de coqueria, Tabela 5.4 [20] ($38,7 \times 10^3 \text{ tep} = 450 \text{ GWh} \times 0.086$)

Considerando o coque como energia de referência, os coeficientes das formas de energia consumidas e produzidas pelas coquerias são descritos na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10. Coeficientes da coqueria

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Coeficiente	Forma de energia produzida	Nível de energia	Coeficiente
Coqueria	Carvão metal.	Primário	1,3375	Coque	Secundário	1,0000
	Gás de coqueria	Secundário	0,0582	Gás de coqueria	Secundário	0,2735
	Eletricidade a alcatrão	Secundário	0,0008	Alcatrão	Secundário	0,0412
	Eletricidade a gás de coqueria	Secundário	0,0072	x	x	x

c.2) Termelétricas a carvão

Uma usina termelétrica consome carvão vapor primário (nacional ou importado) e produz eletricidade secundária.

Para obtenção dos dados das tecnologias Term_Cvap e Term_autop_Cvap foram utilizadas as produções de eletricidade e consumos de carvão vapor das Centrais Elétricas de Serviço Público e Autoprodutoras, descritas nas Tabelas 5.3 e 5.4 [20], respectivamente. Estes dados são descritos na Tabela 11 a seguir.

Tabela 11. Dados de termelétricas a carvão

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Term_Cvap	Carvão vapor	Primário	1837	Eletricidade	Secundário	525,20 (*)
Term_autop_Cvap	Carvão vapor	Primário	53	Eletricidade a carvão vapor	Secundário	21,07 (**)

(*) Produção de Centrais Elétricas de Serviço Público a carvão a vapor, Tabela 5.3 [20] (525,20 x103 tep= 6107 GWh x 0.086)

(**) Produção de Centrais Elétricas Autoprodutoras a carvão a vapor, Tabela 5.4 [20] (21,07 x103 tep= 245 GWh x 0.086)

Considerando a eletricidade produzida como energia de referência, obtêm-se os coeficientes descritos na Tabela 12 a seguir.

Tabela 12. Coeficientes de termelétricas a carvão

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Coeficiente	Forma de energia produzida	Nível de energia	Coeficiente
Term_Cvap	Carvão vapor	Primário	3,498	Eletricidade	Secundário	1
Term_autop_Cvap	Carvão vapor	Primário	2,515	Eletricidade a carvão vapor	Secundário	1

Para a termelétrica a carvão vapor importado utilizou-se os mesmos coeficientes da termelétrica Term_Cvap.

c.3) Carvoarias

Esta tecnologia consome lenha e produz carvão vegetal secundário. Os valores de consumo e produção desta tecnologia foram obtidos da Tabela Consolidado 2005 [20] e estão descritos na Tabela 13 a seguir.

Tabela 13. Dados de carvoaria

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Carvoaria	Lenha	Primário	12173	CVegetal	Secundário	6391

Considerando o carvão vegetal produzido como energia de referência, e os dados de consumo e produção descritos na Tabela 14 a seguir, obtêm-se os seguintes coeficientes.

Tabela 14. Coeficientes da carvoaria

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Coeficiente	Forma de energia produzida	Nível de energia	Coeficiente
Carvoaria	Lenha	Primário	1,925	CVegetal	Secundário	1,000

c.4) Termelétricas a lenha

Uma usina termelétrica a lenha consome lenha primária e produz eletricidade a lenha. Para obtenção dos dados das tecnologias Term_autop_lenha foram utilizadas as produções de eletricidade e consumos de lenha das Centrais Elétricas Autoprodutoras (Tabela 5.4 [20]), apresentados na Tabela 15 a seguir.

Tabela 15. Dados de termelétrica a lenha

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Term_autop-lenha	Lenha	Primário	127	Eletricidade	Secundário	53,2 (*)

(*) Produção de Centrais Elétricas Autoprodutoras a Lenha, Tabela 5.4 [20] (53,2 x103=618*0,086)

Considerando a eletricidade produzida como energia de referência, obtêm-se os coeficientes descritos na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16. Coeficientes de termelétrica a lenha

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Term_autop-lenha	Lenha	Primário	2,390	Eletricidade	Secundário	1,000

d) Transformações de energia primária para final

As tecnologias de transformação de energia primária para final e seus correspondentes montantes de consumo e produção estão detalhados na Tabela 17 a seguir.

Tabela 17. Dados das tecnologias de transformação de energia primária para final

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Lenha_PF	Lenha	Primário	16119	Lenha	Final	16119
Cvapor_PF	Cvapor	Primário	341	Cvapor	Final	341
Cmet_PF	Cmet	Primário	3200	Cmet	Final	3178

Considerando as formas de energia consumida como energia de referência, obtêm-se os coeficientes descritos na Tabela 18 a seguir.

Tabela 18. Coeficientes das tecnologias de transformação de energia primária para final

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Coeficiente	Forma de energia produzida	Nível de energia	Coeficiente
Lenha_PF	Lenha	Primário	1,000	Lenha	Final	1,000
Cvapor_PF	Cvapor	Primário	1,000	Cvapor	Final	1,000
Cmet_PF	Cmet	Primário	1,000	Cmet	Final	0,993

e) Transformações de energia secundária para secundária

Nesta classe estão incluídas as centrais termelétricas autoprodutoras a alcatrão (Term_autop-alcat) e a gás de coqueria (Term_autop-alcat) e seus correspondentes montantes de consumo e produção estão detalhados na Tabela 19 a seguir.

Os montantes de consumo das tecnologias foram obtidos diretamente da Tabela Consolidado 2005 [20]. O montante de produção referente à tecnologia Term_autop_alcat foi estimado pelo montante de alcatrão consumido (13 x 10³ tep) multiplicado pelo rendimento médio das Centrais Elétricas Autoprodutoras de Outras Secundárias (1127 x 0,086/282, dados obtidos da Tabela 5.4 [20]). O montante de produção referente à tecnologia Term_autop-gascoq foi obtido diretamente da Tabela Consolidado 2005 [20].

Tabela 19. Dados de termelétricas autoprodutoras

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Term_autop-alcat	Alcatrão	Secundário	13	Eletricidade a alcatrão	Secundário	4,468
Term_autop-gascoq	Gás coqueria	Secundário	139	Eletricidade a gás de coqueria	Secundário	38,7

Considerando a eletricidade produzida como energia de referência, obtêm-se os os coeficientes descritos na Tabela 20 a seguir.

Tabela 20. Coeficientes de termelétrica autoprodutoras

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Term_autop-alcatrão	Alcatrão	Secundário	2,910	Eletricidade a alcatrão	Secundário	1,000
Term_autop-gascoq	Gás coqueria	Secundário	3,592	Eletricidade a gás de coqueria	Secundário	1,000

f) Transformações de energia secundária para final

As tecnologias de transformação de energia secundária para final e seus correspondentes montantes de consumo e produção estão detalhados na Tabela 21 a seguir.

Tabela 21. Dados das tecnologias de transformação de energia secundária para final

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Cveg_SF	CVegetal	Secundário	6391	CVegetal	Final	6248
Gás coq_SF	Gás coque	Secundário	1016	Gás coque	Final	1016
Coque_SF	Coque	Secundário	6420	Coque	Final	6420
Eletricidade_SF	Eletricidade	Secundário	525,20	Eletricidade	Final	525,20
Alcatrão_SF	Alcatrão	Secundário	208	Alcatrão	Final	197

Considerando a forma de energia consumida como energia de referência, obtêm-se os seguintes coeficientes listados na Tabela 22 a seguir.

Tabela 22. Coeficientes das tecnologias de transformação de energia secundária para final

Tecnologia	Forma de energia consumida	Nível de energia	Montante (10³ tep)	Forma de energia produzida	Nível de energia	Montante (10³ tep)
Cveg_SF	CVegetal	Secundário	1,000	CVegetal	Final	0,978
Gás coq_SF	Gás coque	Secundário	1,000	Gás coque	Final	1,000
Coque_SF	Coque	Secundário	1,000	Coque	Final	1,000
Eletricidade	Eletricidade	Secundário	1,000	Eletricidade	Final	1,000
Alcatrão	Alcatrão	Secundário	1,000	Alcatrão	Final	0,947

g) Exportações

Os dados das tecnologias de exportação estão descritos na Tabela 23 seguir, e não havendo perdas, seus coeficientes são unitários.

Tabela 23. Dados das exportações

Tecnologia	Forma de energia consumida	Montante em 10³ tep	Nível de energia	Forma de energia produzida	Montante em 10³ tep	Nível de energia
Coque_SE	Coque	1	Secundário	Coque	1	Export
CVeg_SE	CVegetal	10	Secundário	CVegetal	10	Export

4.2.6 Dados Adicionais

Os dados de capacidade histórica, atividade histórica, fatores de capacidade máxima e mínima, vida útil, custos de investimento e de operação estão detalhados na Tabela 24 a seguir.

Tabela 24. Dados Adicionais

Tecnologia	Energia de referência	Cap. Hist. 10³ tep	Ativ. Hist 10³ tep	FC max-min	V.Útil	C.Invest	COper
Ext_Cvapor	Carvão vapor	2.500	2.348	1-0	15	483 US\$/tep	190 US\$/tep
Ext_CMet	Carvão metalúrgico	150	135	1-0	15	483 US\$/tep	190 US\$/tep
Madereira	Lenha	30.000	28.420	1-0	50	0 US\$/tep	400 US\$/tep
Imp_CMet	Cmet	15.000	10.137	1-0	15	48,3 US\$/tep	4,83 US\$/tep
Imp_CVeg	Cveg	1.000	58	1-0	15	48,3 US\$/tep	4,83 US\$/tep
Imp_CVapor	Cvap	1.000	0	1-0	15	48,3 US\$/tep	334 US\$/tep
Imp_Coque	Coque	1.500	1.202	1-0	25	24,3 US\$/tep	2,43 US\$/tep
Term_CImp	Eletricidade	0	0	0,9-0,4	25	2124 US\$/tep	58 US\$/tep
Term_Cvap	Eletricidade	1066 (*)	525	0,9-0,4	25	2124 US\$/tep	58 US\$/tep
Term_autop_lenha	Eletricidade	70	53	1-0	25	2300 US\$/tep	70 US\$/tep
Term_autop_gascoq	Eletricidade	50	39	1-0	25	2300 US\$/tep	60 US\$/tep

Term_autop_cvapor	Eletricidade	25	22	1-0	25	2400 US\$/tep	65 US\$/tep
Term_autop_alcatrão	Eletricidade	16	4,4	1-0	25	2300 US\$/tep	68 US\$/tep
Coqueria	Coque	6.000	5363	0,9-0,0	25	483 US\$/tep	58 US\$/tep (**)
Carvoaria_PS	Lenha	13.000	12.300	0,9-0	15	50 US\$/tep	3 US\$/tep
CVap_PF	Carvão vapor	341	341	1-0	15	0	0
Lenha_PF	Lenha	16.119	16.119	1-0	15	0	0
CMet_PF	Carvão metalúrgico	3.200	3.200	1-0	15	0	0
Carv_veg_SF	Carvão vegetal	6.391	6.391	1-0	15	0	0
Elec_SF	Eletricidade	10.000	525	1-0	15	0	0
Alcatrão_SF	Alcatrão	208	208	1-0	15	0	0
Coque_SF	Coque	6.420	6.420	1-0	15	0	0
Gás_coq_SF	Gás coqueria	1.016	1.016	1-0	15	0	0
Coque_SE	Coque	1	1	1-0	15	0	0
Cveg_SE	Carvão vegetal	10	10	1-0	15	0	0

(*) Térmicas a carvão em operação no SIN em 2005 (1415 MW)

(**) Valor igual ao da térmica a carvão

(***) Valor obtido do site www.khronopedia-je.incubadora.fapesp.br

4.3 Resultados

A aplicação da modelagem das cadeias de carvão e lenha apresentada nos itens anteriores no sistema MATRIZ é detalhada no Manual do Usuário. As Tabelas 25 e 26 a seguir resumem os resultados obtidos com a simulação do programa MATRIZ. O gráfico da Figura 10 ilustra, como exemplo, o balanço de demanda do gás de coqueria.

Tabela 25. Expansão da capacidade das tecnologias, por período (em tep/ano)

TECNOLOGIA	2008-12	2013-17	2018-22	2023-27	2028-33
extr_cmet	0	0	0	0	0
extr_cvapor	567	845	3584	4553	0
cimp_cmet	0	2419	19814	16400	0
Cimp_Cvapor	0	0	0	0	0
Imp_Coque	0	0	0	0	0
Clmp_Cveg	0	0	0	0	0
coqueria	2258	8909	0	0	10743
Term_Cvap	0	652	0	0	1542
Term_autop_Cvap	3	30	0	0	41
Term_autop_lenha	0	37	0	0	94
carvoaria	0	0	13386	8417	0
Lenha_PF	2541	5155	22699	26811	0
Cvapor_PF	54	109	480	567	0
Cmet_PF	505	1023	4507	5323	0
Term_autop-alcat	0	0	0	0	20
Term_autop-gascoq	2	56	0	0	80
Cveg_SF	1005	2043	8999	10623	0
Gás coq_SF	160	325	1431	1690	0
Coque_SF	1012	2053	9041	10678	0
Eletricidade_SF	178	205	829	1145	0
Alcatrão_SF	33	67	293	346	0
Madeira	3040	9119	11637	14849	18952
Term_cimp	0	0	0	0	0
Importador	13649	3770	4814	6141	7840
Auto_cons_coqueria	431	119	152	194	248
Coque_SE	0	0	0	0	0
CVeg_SE	0	0	0	0	0

Tabela 26. Formas de Energia – Produção e consumo das tecnologias

Forma_de_Energia	Relacao	Tecnologia	Modo de Operação	2008-12	2013-17	2018-22	2023-27	2028-33
carvão metalurgico	CONS	extr cmet	1	0	0	0	0	0
carvão vapor	CONS	extr cvapor	1	3067	3912	4996	6373	8136
CMet/primário	PROD	extr cmet	1	0	0	0	0	0
CMet/primário	PROD	cimp cmet	1	13649	17419	22233	28374	36214
CMet/primário	CONS	coqueria	1	9944	12691	16198	20672	26384
CMet/primário	CONS	Cmet PF	1	3705	4728	6035	7702	9830
Cvapor/primário	PROD	extr cvapor	1	3067	3912	4996	6373	8136
Cvapor/primário	CONS	Term Cvap	1	2603	3320	4240	5408	6905
Cvapor/primário	CONS	Term autop Cvap	1	69	89	113	144	184
Cvapor/primário	CONS	Cvapor PF	1	395	504	643	821	1047
CVapor Imp/primário	PROD	Cimp Cvapor	1	0	0	0	0	0
CVapor Imp/primário	CONS	Term cimp	1	0	0	0	0	0
Coque/secundário	PROD	Imp Coque	1	0	0	0	0	0
Coque/secundário	PROD	coqueria	1	7432	9485	12106	15450	19719
Coque/secundário	CONS	Coque SF	1	7432	9485	12106	15450	19719
Coque/secundário	CONS	Coque SE	1	0	0	0	0	0
CVeg/secundário	PROD	Cimp Cveg	1	0	0	0	0	0
CVeg/secundário	PROD	carvoaria	1	7396	9439	12047	15375	19623
CVeg/secundário	CONS	Cveg SF	1	7396	9439	12047	15375	19623
CVeg/secundário	CONS	CVeg SE	1	0	0	0	0	0
gás coqueria/secundário	PROD	coqueria	1	2036	2599	3317	4233	5403
gás coqueria/secundário	CONS	Term autop-gascoq	1	187	239	304	389	496
gás coqueria/secundário	CONS	Gás coq SF	1	1176	1501	1916	2445	3121
gás coqueria/secundário	CONS	Auto cons coqueria	1	431	550	702	896	1144
alcatrão/secundário	PROD	coqueria	1	305	389	496	634	809
alcatrão/secundário	CONS	Term autop-alcat	1	22	28	35	45	57
alcatrão/secundário	CONS	Alcatrão SF	1	241	307	392	501	639
eletricidade/secundário	PROD	Term Cvap	1	744	949	1212	1546	1974
eletricidade/secundário	PROD	Term cimp	1	0	0	0	0	0
eletricidade/secundário	CONS	Eletricidade SF	1	744	949	1212	1546	1974
lenha/primário	PROD	Madeira	1	33040	42159	53796	68645	87597
lenha/primário	CONS	Term autop lenha	1	143	175	210	256	313
lenha/primário	CONS	carvoaria	1	14237	18169	23191	29597	37774
lenha/primário	CONS	Lenha PF	1	18660	23815	30395	38792	49510
lenha/final	PROD	Lenha PF	1	18660	23815	30395	38792	49510
Cvapor/final	PROD	Cvapor PF	1	395	504	643	821	1047
Cmet/final	PROD	Cmet PF	1	3679	4695	5993	7648	9761
Cveg/final	PROD	Cveg SF	1	7233	9231	11782	15037	19191
gás coqueria/final	PROD	Gás coq SF	1	1176	1501	1916	2445	3121
Coque/final	PROD	Coque SF	1	7432	9485	12106	15450	19719
eletricidade/final	PROD	Eletricidade SF	1	744	949	1212	1546	1974
alcatrão/final	PROD	Alcatrão SF	1	228	291	371	474	605
Coque/export	PROD	Coque SE	1	0	0	0	0	0
Cveg/export	PROD	CVeg SE	1	0	0	0	0	0
Importação/importação	PROD	Importador	1	13649	17419	22233	28374	36214
Importação/importação	CONS	cimp cmet	1	13649	17419	22233	28374	36214
Importação/importação	CONS	Cimp Cvapor	1	0	0	0	0	0
Importação/importação	CONS	Imp Coque	1	0	0	0	0	0
Importação/importação	CONS	Cimp Cveg	1	0	0	0	0	0
Auto cons gascoq/autocons	PROD	Auto cons coqueria	1	431	550	702	896	1144
Auto cons gascoq/autocons	CONS	coqueria	1	431	550	702	896	1144
eletr cvap/secundário	PROD	Term autop Cvap	1	28	35	45	57	73
eletr cvap/secundário	CONS	extr cvapor	1	28	35	45	57	73
eletr alcatrão/secundário	PROD	Term autop-alcat	1	7	10	12	15	20
eletr alcatrão/secundário	CONS	coqueria	1	7	10	12	15	20
eletr gascoq/secundário	PROD	Term autop-gascoq	1	52	66	85	108	138
eletr gascoq/secundário	CONS	coqueria	1	52	66	85	108	138
eletr lenha/final	PROD	Term autop lenha	1	60	73	88	107	131

Gás de Coqueria: Produção X Consumo

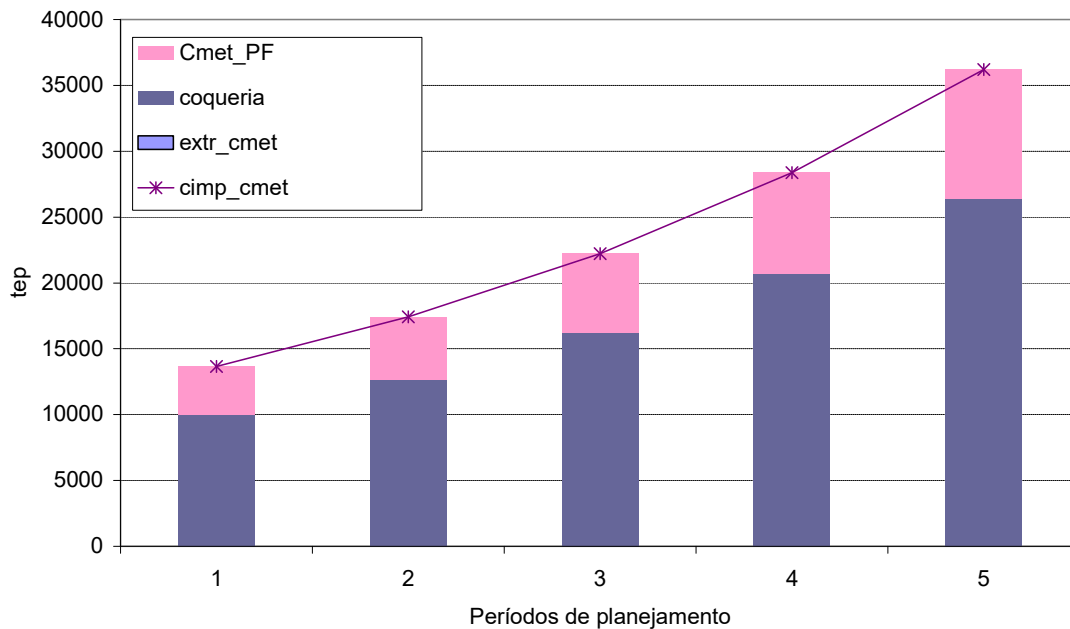


Figura 10. Produção e Consumo de gás de coqueria

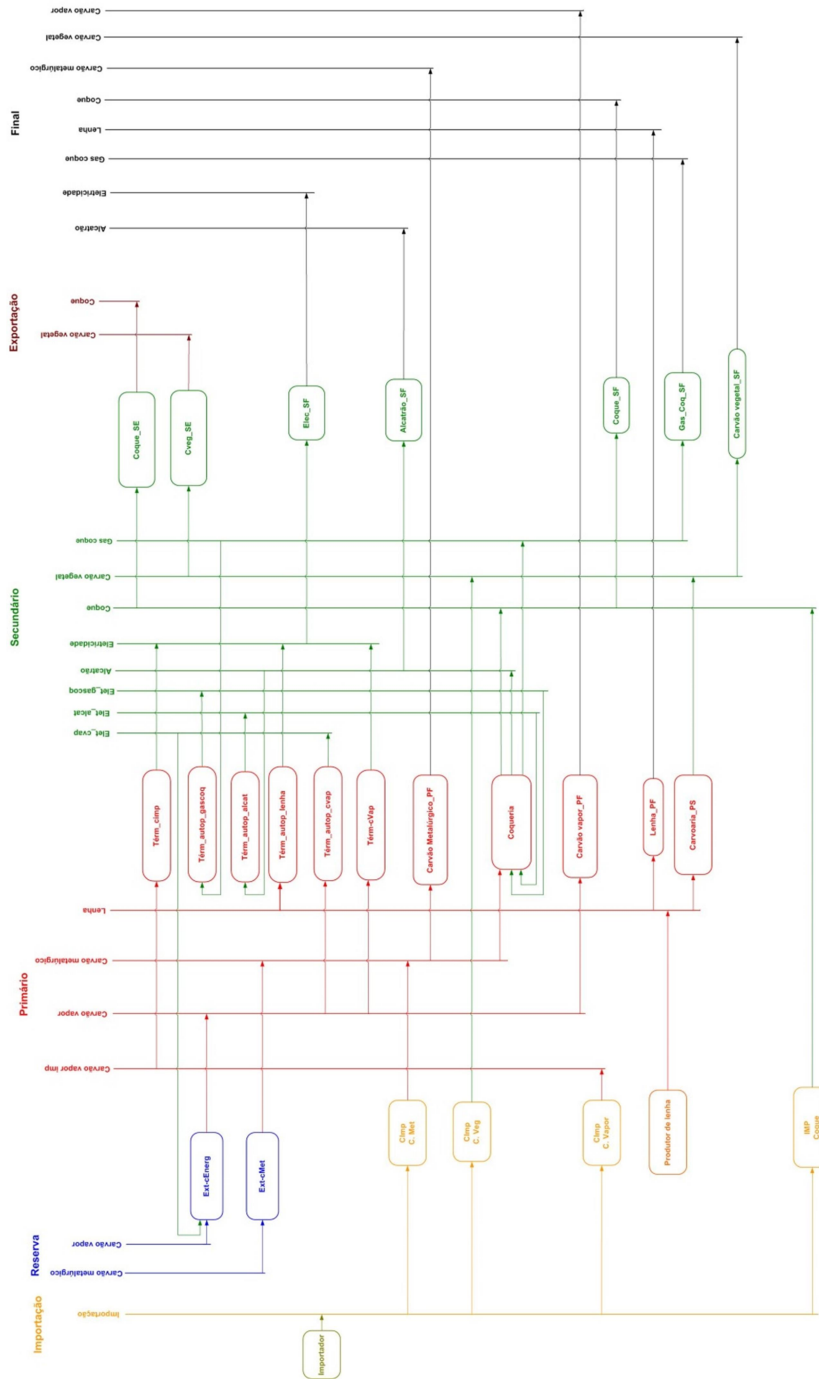
5 Referências

- [1] Terry, L., Melo, A., Lisboa, M., et al. "Application of the MELP Program to Define a Long Term Generation and Interconnection Expansion Plan for the Brazilian System". IX SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, n. SP-006, 2004.
- [2] Lisboa, M. L. V., Maceira, M. E. P., Marzano, L. G. B., Sabóia, C. H. M., CEPEL - DP/DEA 23615/07 "Manual de Metodologia do Modelo MELP", 2007.
- [3] Lisboa, M. L., Marzano, L. G. B., Sabóia, C. H. M., et al. "A mixed integer programming model for long term generation expansion planning of the brazilian system." 16th Power System Computation Conference. 16th Power System Computation Conference, July 2008.
- [4] Maceira, M. E. P., Duarte, V. S., Penna, D. D. J., Moraes, L. A. M., Melo, A. C. G., "Ten Years of Application of Stochastic Dual Dynamic Programming in Official and Agent Studies in Brazil Description of the NEWAVE Program," in Proc. 2008 Power System Computation Conference, 2008.
- [5] Maceira, M. E. P., Penna, D. D. J., Vasconcellos, C. L., Cruz, C. B., Diniz, A. L., "Modelo estratégico de geração hidrotérmica a subsistemas interligados - NEWAVE, Manual do Usuário", Relatório Técnico CEPEL - DP/DEA 28322/2016, 2016.
- [6] Maceira, M. E. P., Batista, F. R. S., "Manual de Referência do Modelo SUISHI – Versão 7.1", Relatório Técnico CEPEL-DP/DEA 46211/10, 2010.
- [7] Marzano, L. G. B., Batista, F. R. S., Maceira, M. E. P., Melo, A. C. G., Justino, T. C., Ginaid, A., "A Multi-Area Approach to Evaluate the Brazilian Power System Capacity to Supply the Peak Load Demand Using Detailed Simulation Model of Power Plants Operation," in Proc. 2014 Power System Computation Conference, 2014.
- [8] Manne, A. and R. Richels, "Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of CO2 Emissions Limits", The MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1992.
- [9] Manne, A.S., Mendelsohn, R., e Richels, R.G., "MERGE: A Model for Evaluating Regional and Global Effects of GHG Reduction Policies." In Integrative Assessment of Mitigation, Impacts, and Adaptation to Climate Change, ed., 1993.
- [10] Zwaan, B.C.C. van der, R. Gerlagh, G. Klaassen, and L. Schratzenholzer (2002). "Endogenous technological change in climate change modelling". Energy Economics, 24:1-19.
- [11] Gerlagh, R. and B.C.C. van der Zwaan (2004). "A sensitivity analysis on timing and costs of greenhouse gas abatement, calculations with DEMETER". Climatic Change 65:39-71.
- [12] Gerlagh, R. and B.C.C. van der Zwaan (2003). "Gross World Product and Consumption in a Global Warming Model with Endogenous Technological Change". Resource and Energy Economics, 25:35- 57.
- [13] Loulou, R., Goldstein, G., Noble, K., "Documentation for the MARKAL Family of Models". ETSAP- Energy Technology Systems Analysis Programme, October 2004.
- [14] Messner, S. e Strubegger, M., 1995, "User's Guide for MESSAGE III", WP-95-69, International Institute for Applied Systems Analysis, Luxemburg, Austria, 1995.
- [15] Messner, S. e Schratzenholzer, L., "MESSAGE-MACRO: linking an energy supply model with a macroeconomic module and solving it iteratively", Energy 25, 267-282, 2000.
- [16] Seebregts, A., Goldstein, G., "Energy/Environmental Modeling with the MARKAL Family of Models", Proceedings of the OR2001 Conference, Energy and Environment Session, Duisburg, Alemanha, 2001.
- [17] Melo, A. C. G., Maceira, M. E. P., Lisboa, M. L. V., Marzano, L. G. B., Sabóia, C. H. M., Damázio, J. M., Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia, "Plano Nacional de Energia 2030", 2007.

- [18] Melo, A. C. G., Maceira, M. E. P., Lisboa, M. L. V., Marzano, L. G. B., Sabóia, C. H. M., Damázio, J. M., Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia, “Matriz Energética Nacional 2030”, 2007.
- [19] Lisboa, M. L.V., Marzano, L. G. B., Sabóia, C. H. M., Damázio, J. M., “Representação do Sistema de Gás Natural no Modelo Computacional MELP”, XI SEPOPE - Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Belém, 2009.
- [20] Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia, “Balanço Energético Nacional 2006”.
- [21] Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética , “Plano Decenal de Expansão de Energia 2019”.
- [22] “Boletim Mensal de Geração Eólica – Setembro 2016”, ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2016.

6 Apêndice A – Diagrama das cadeias do carvão e da lenha

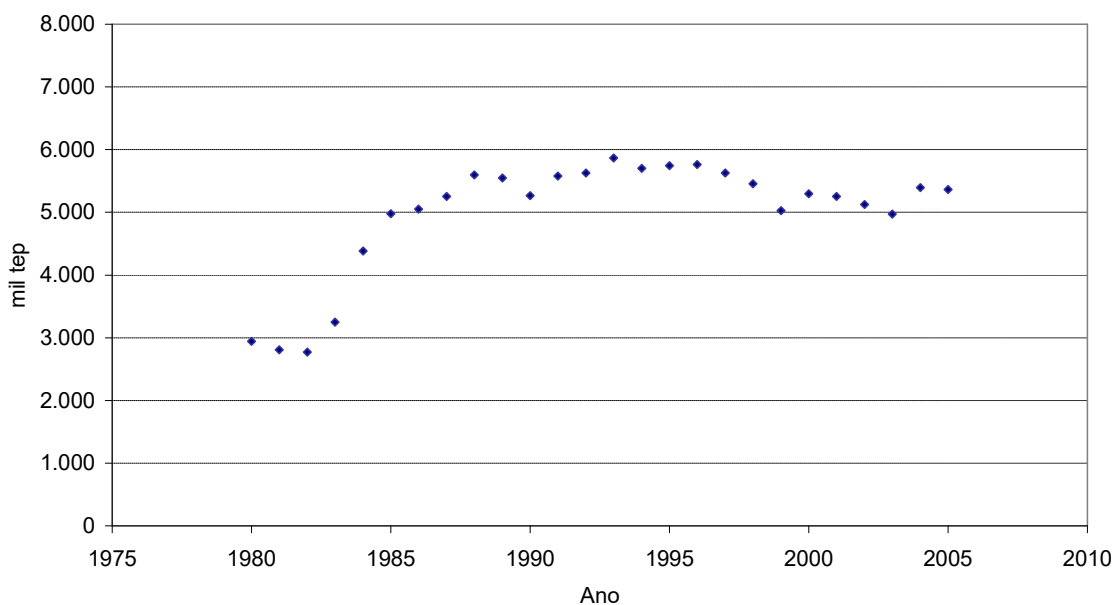
As cadeias do carvão e da lenha completas estão ilustradas no diagrama a seguir.



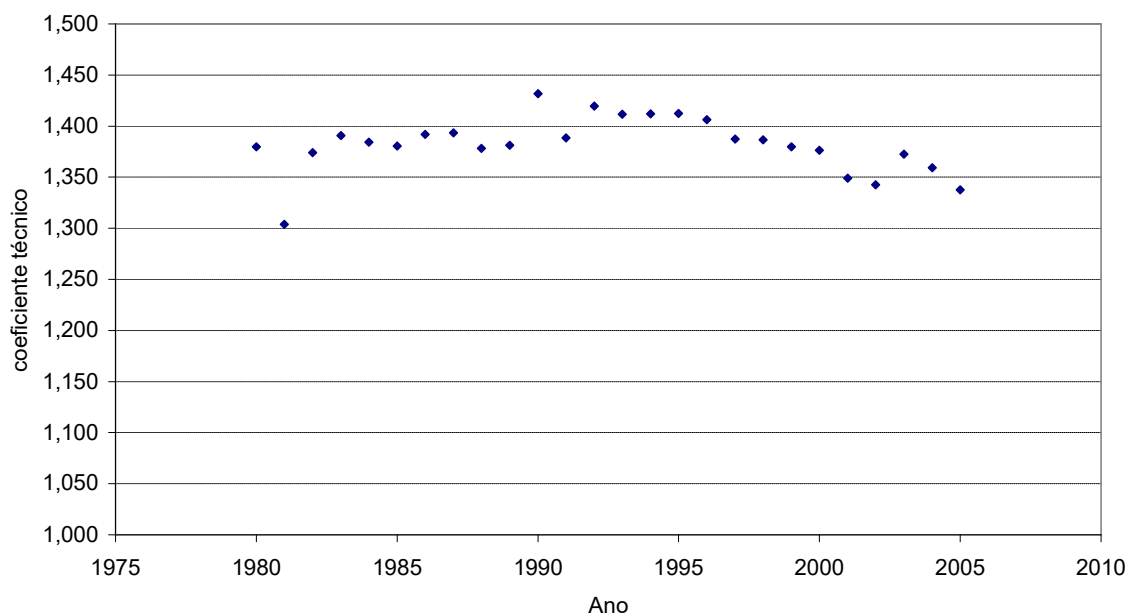
7 Apêndice B - Coeficientes Técnicos Históricos

Com base nos balanços energéticos de 1980 a 2005 constantes no BEN 2006 [20], foram calculados, para cada ano deste período, os coeficientes técnicos das tecnologias das cadeias de carvão e da lenha descritos no item 3. O cálculo destes coeficientes teve por objetivo verificar o comportamento dos coeficientes ao longo deste período de forma a concluir sobre a adequação dos mesmos para uso na formulação proposta.

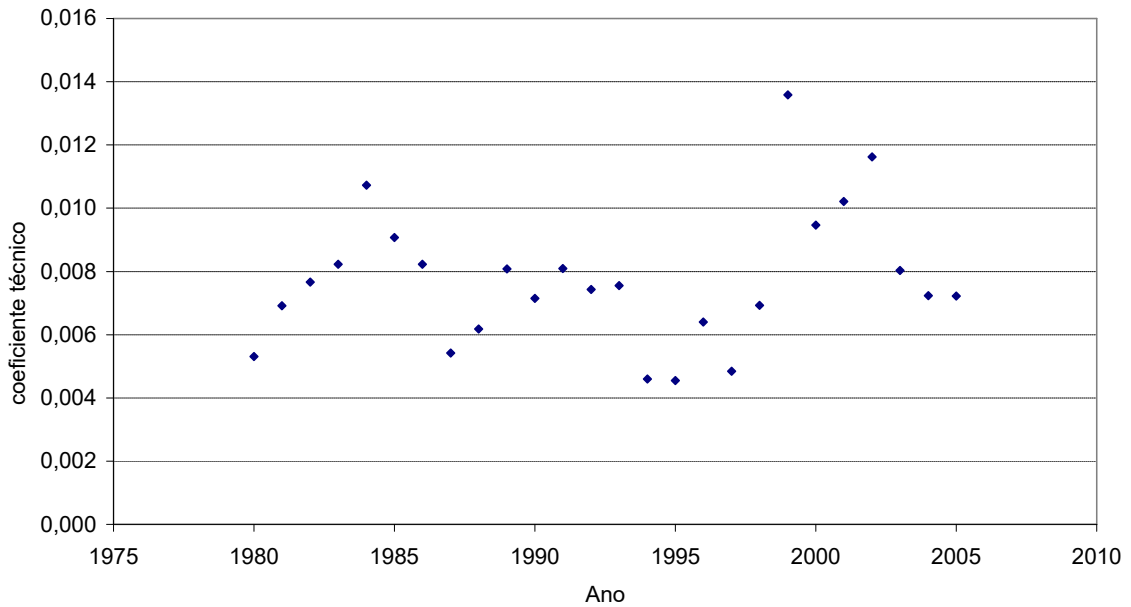
Coque produzido pela coqueria



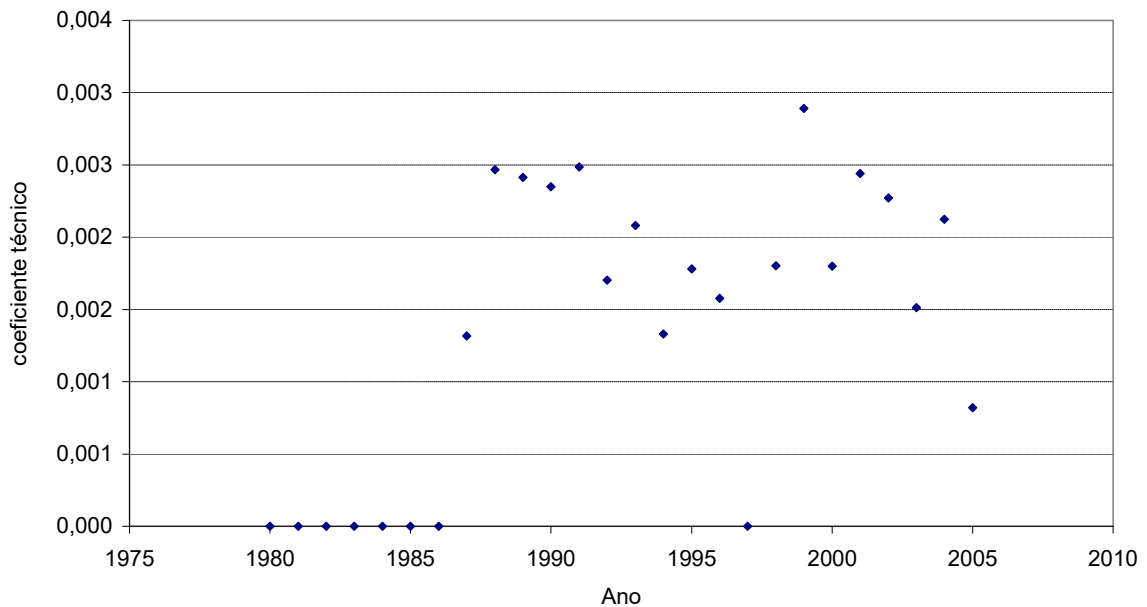
Carvão metalúrgico consumido na coqueria



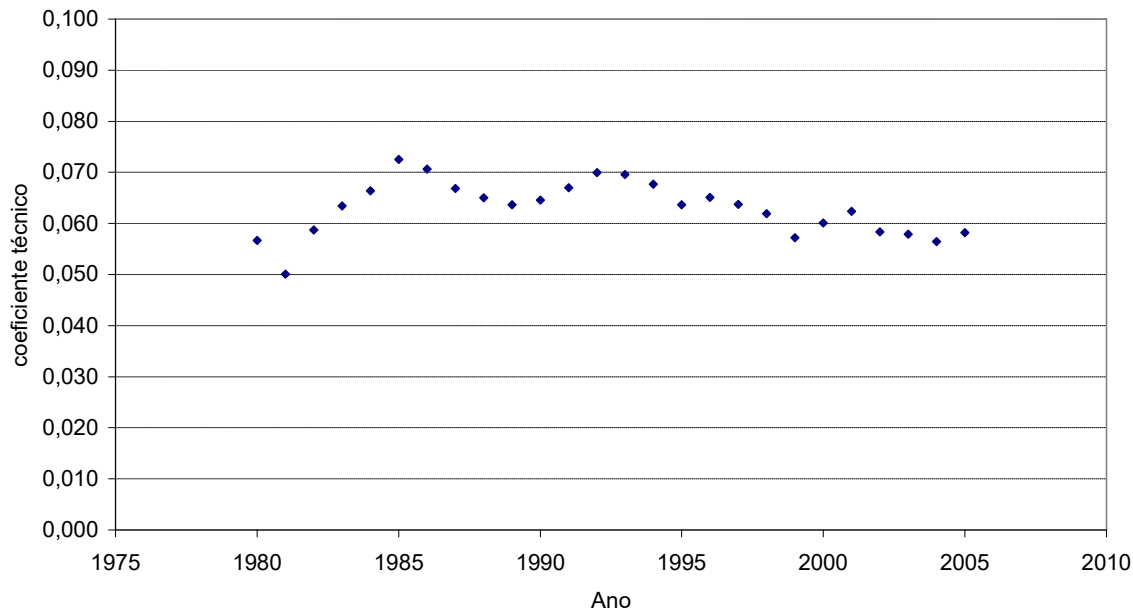
Eletricidade a gás de coqueria consumida pela coqueria



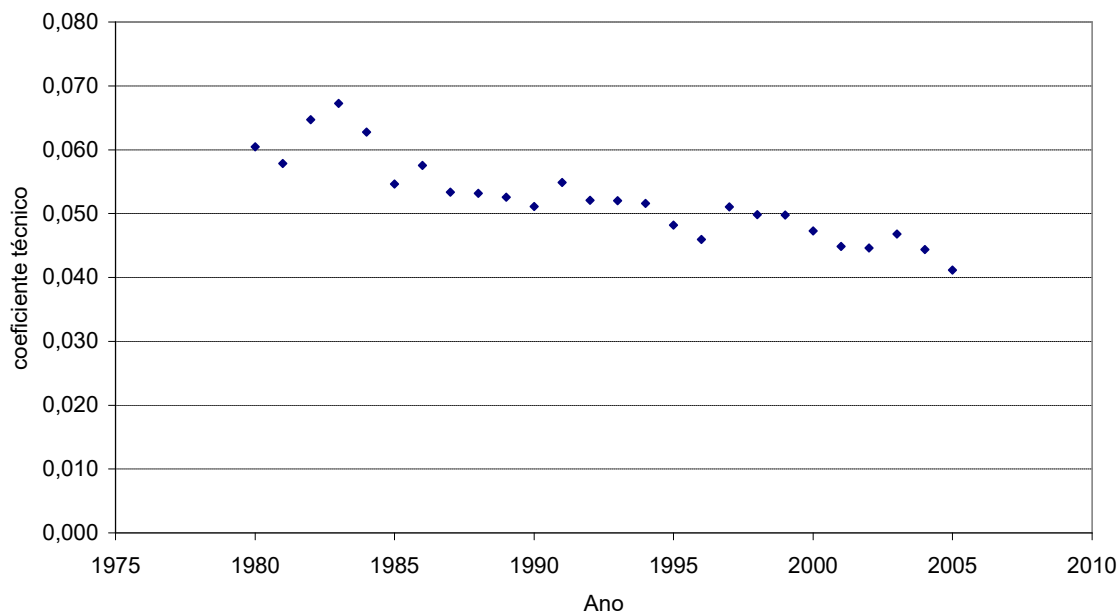
Eletricidade a alcatrão consumida na coqueria



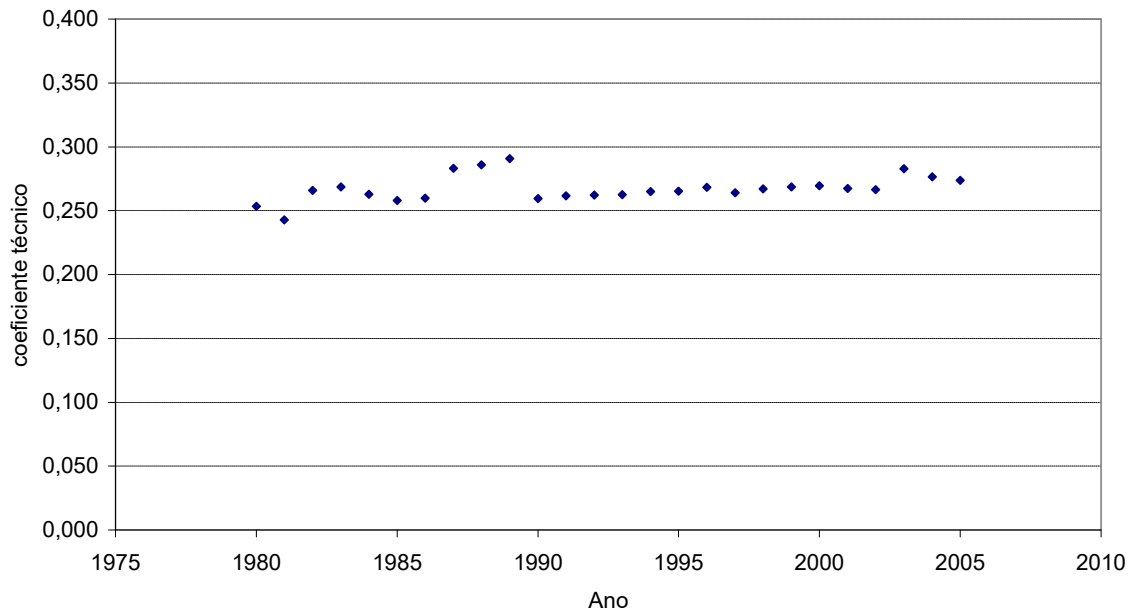
Gás de coqueria consumido na coqueria



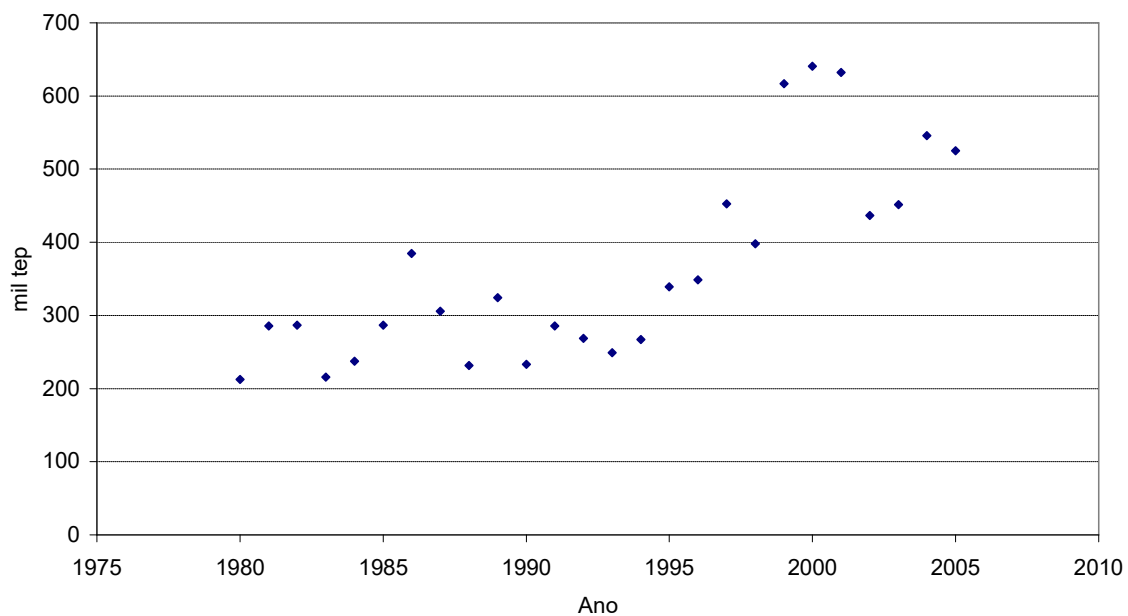
Alcatrão produzido na coqueria



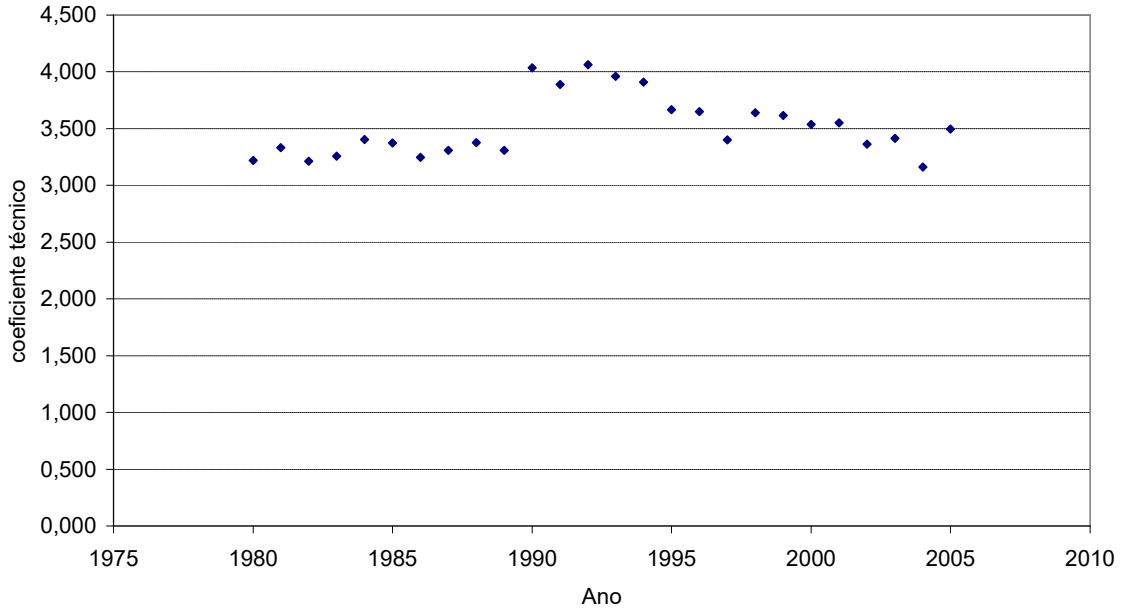
Gás de coqueria produzido na coqueria



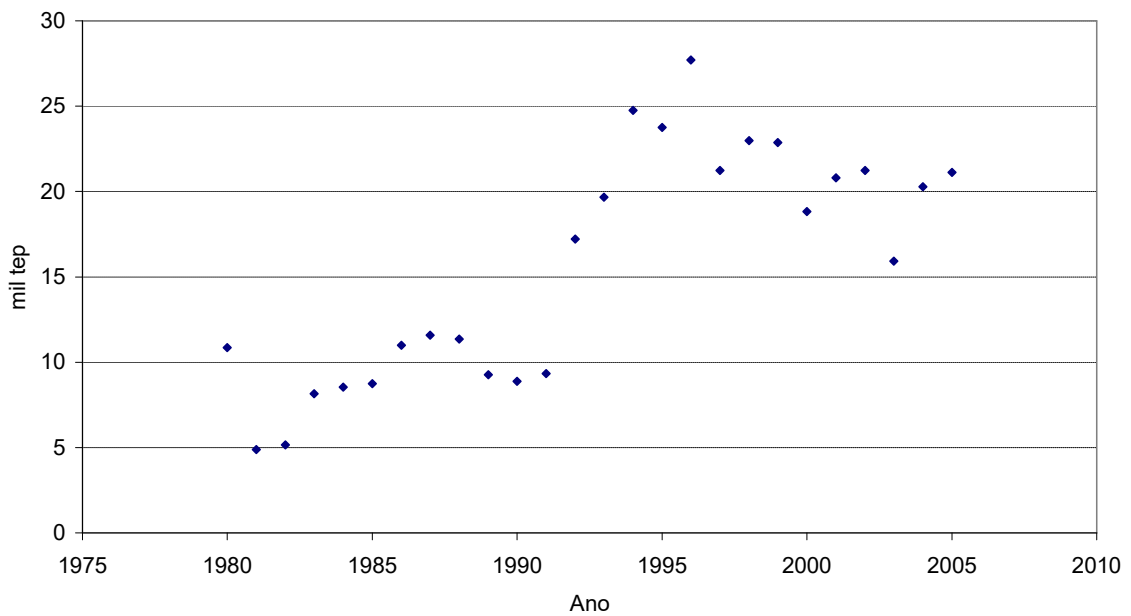
Eletricidade produzida pelas Térmicas a C vapor Serv. Público



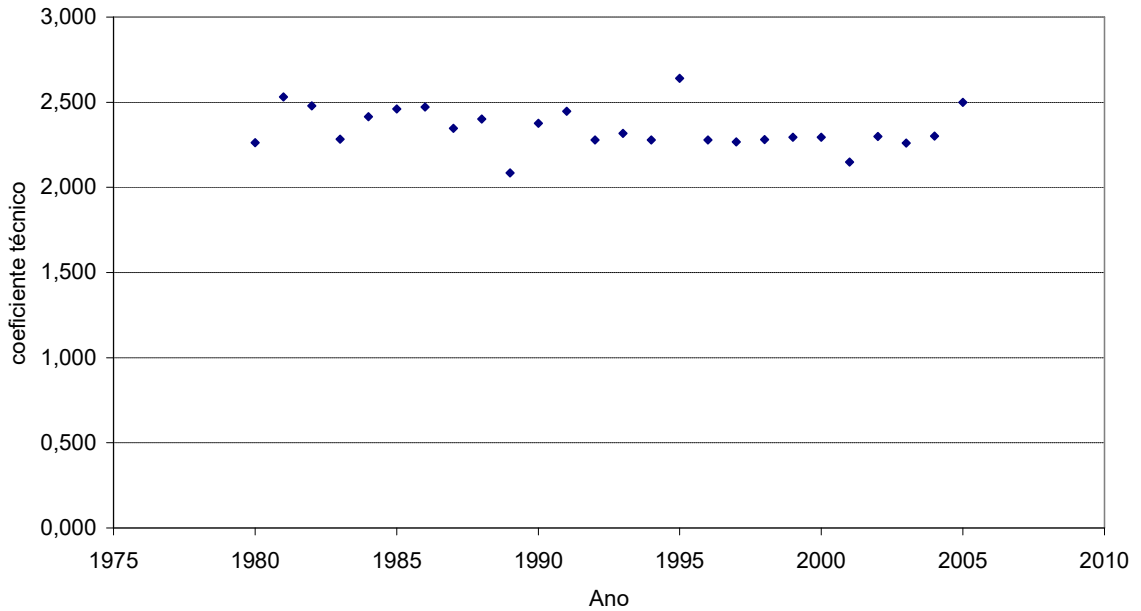
Carvão vapor consumido pelaTerm_Cvap



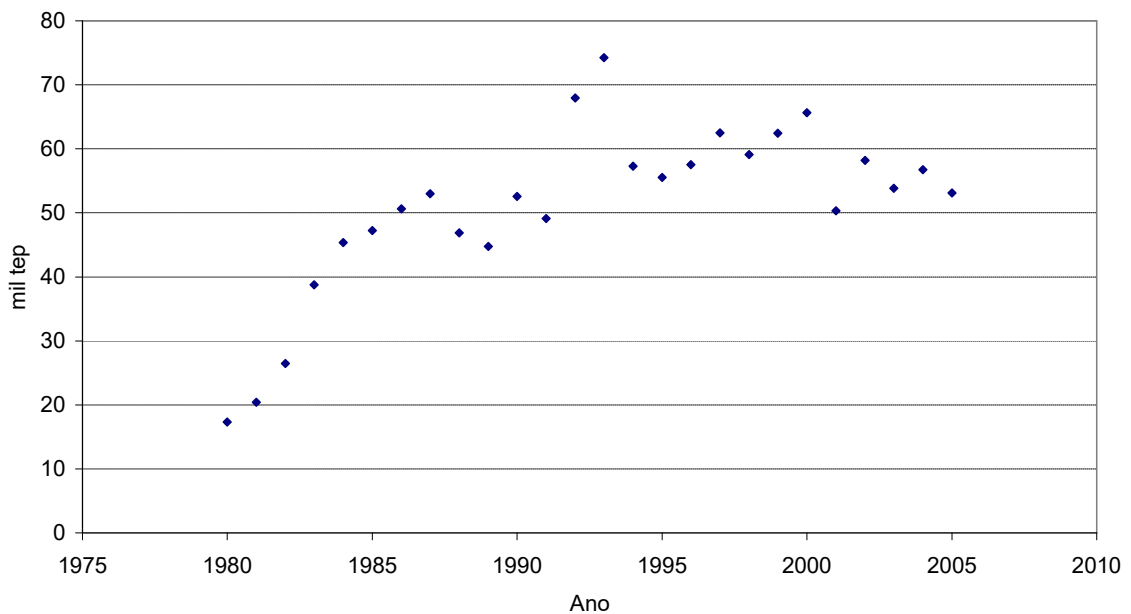
Eletricidade produzida pela Term_autop_Cvap



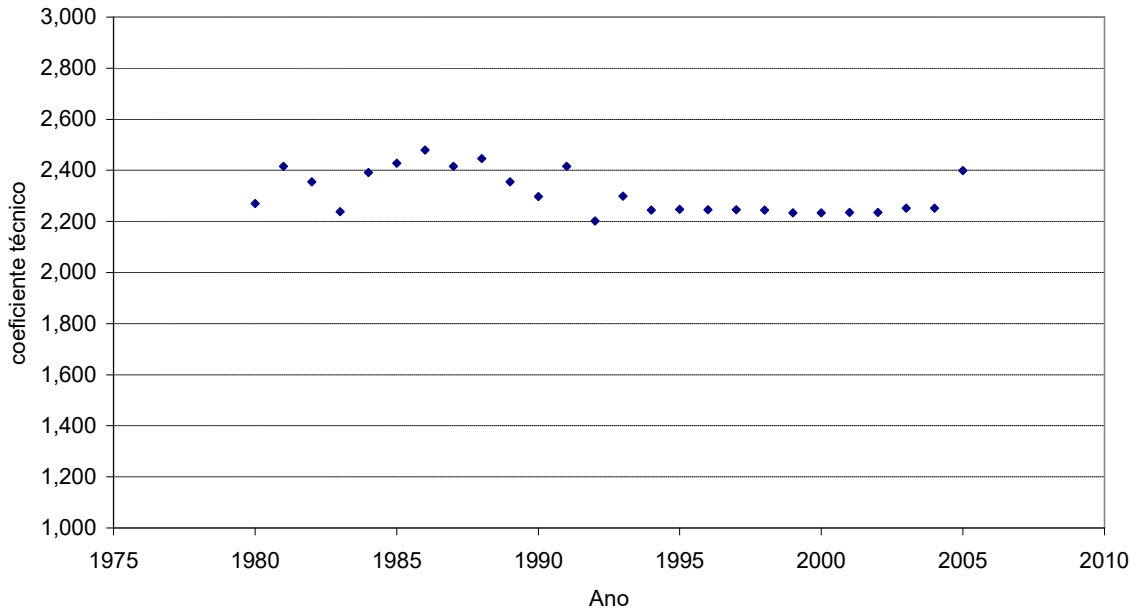
Carvão vapor consumido pela Term_autop_Cvap



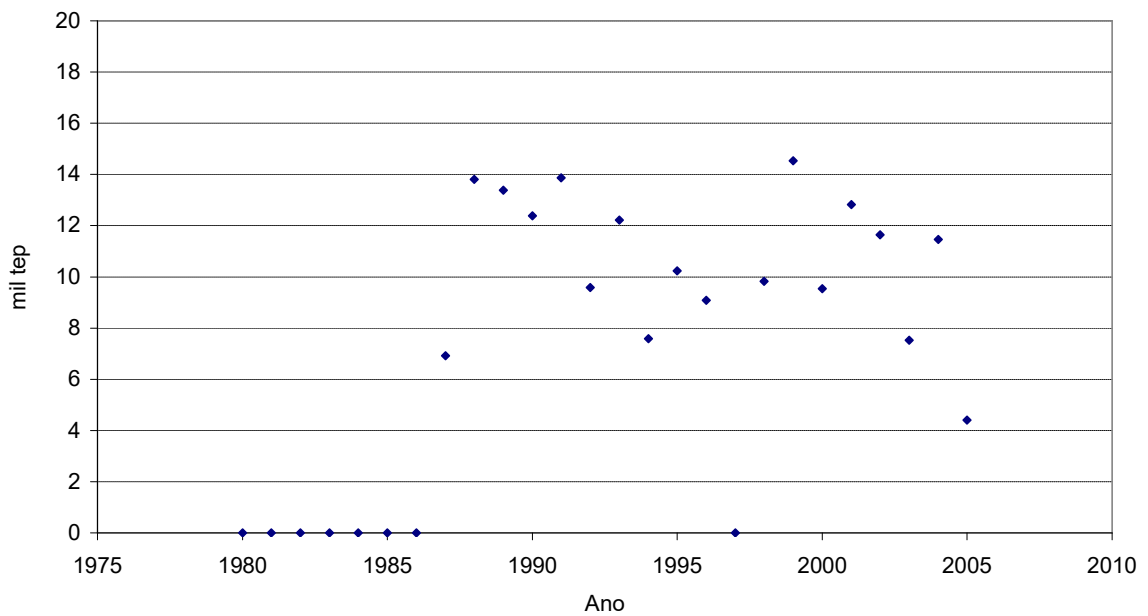
Eletricidade produzida pela Term_autop-lenha



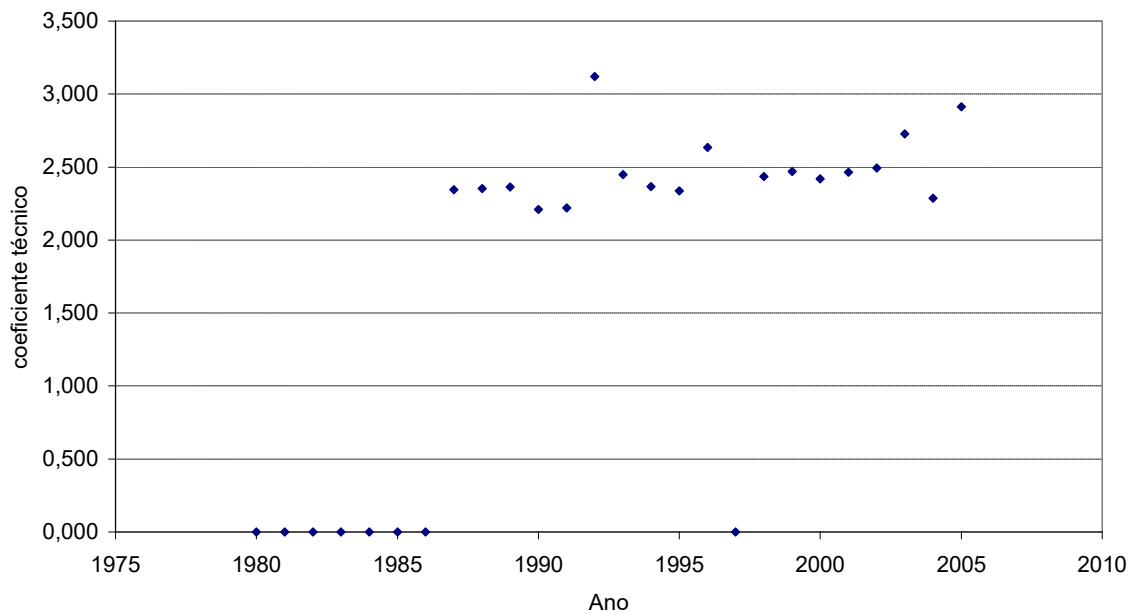
Lenha consumida pelaTerm_autop-lenha



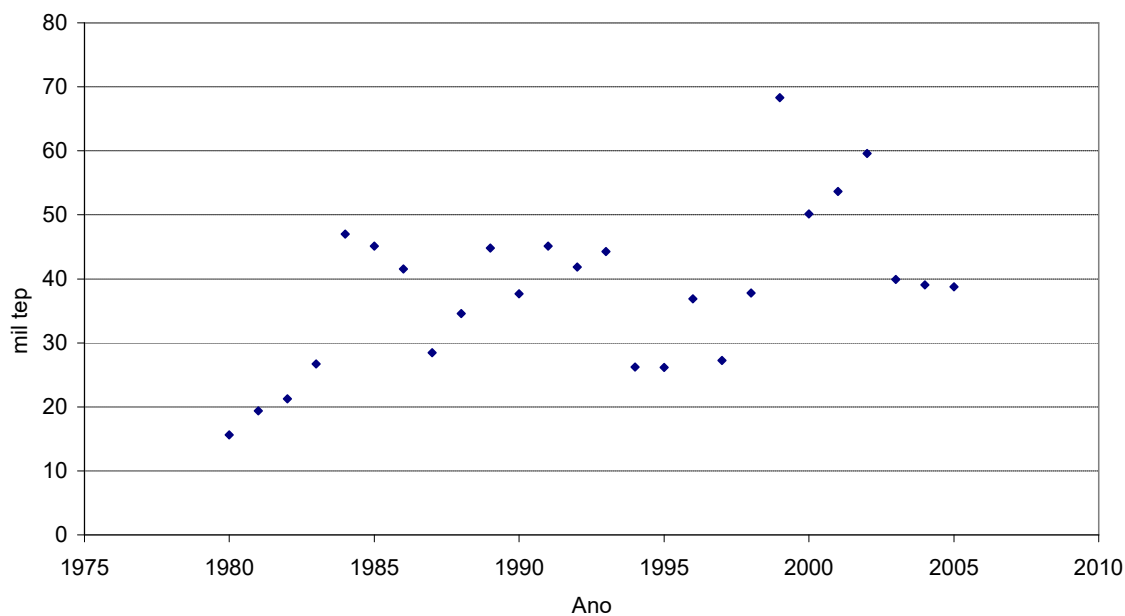
Eletricidade produzida pela Term_autop-alcat



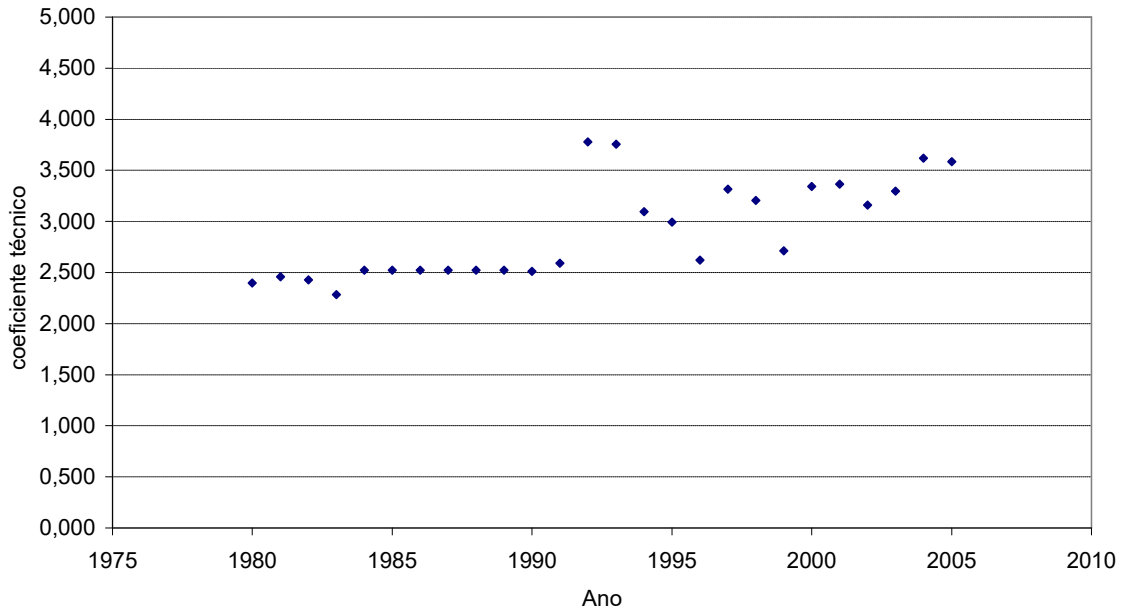
Alcatrão consumido pela Term_autop-alcat



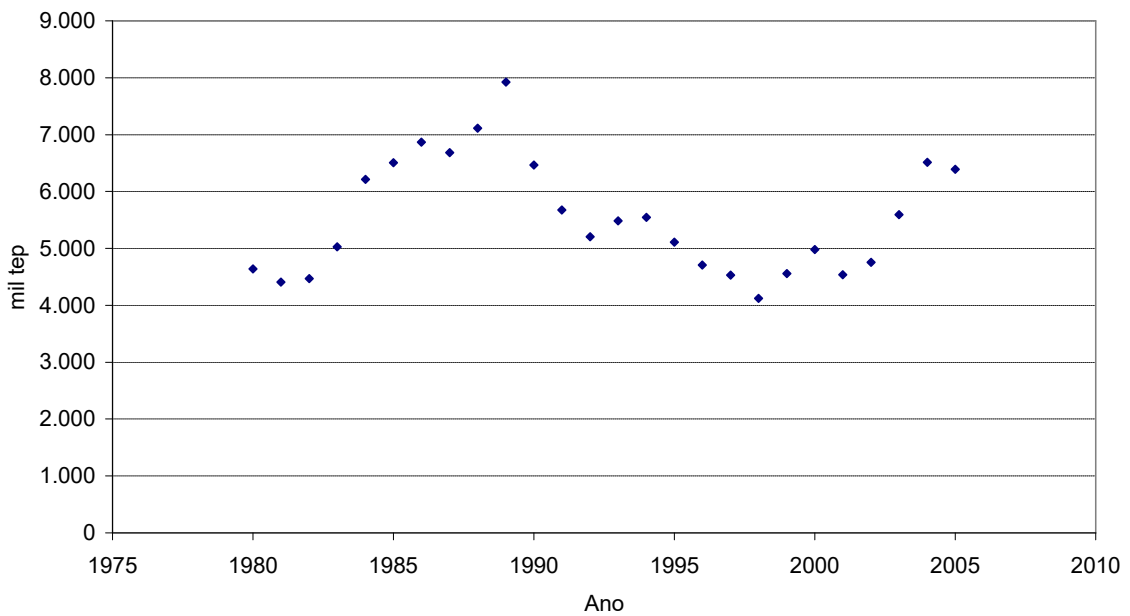
Eletricidade produzida pela Term_autop-gascoq



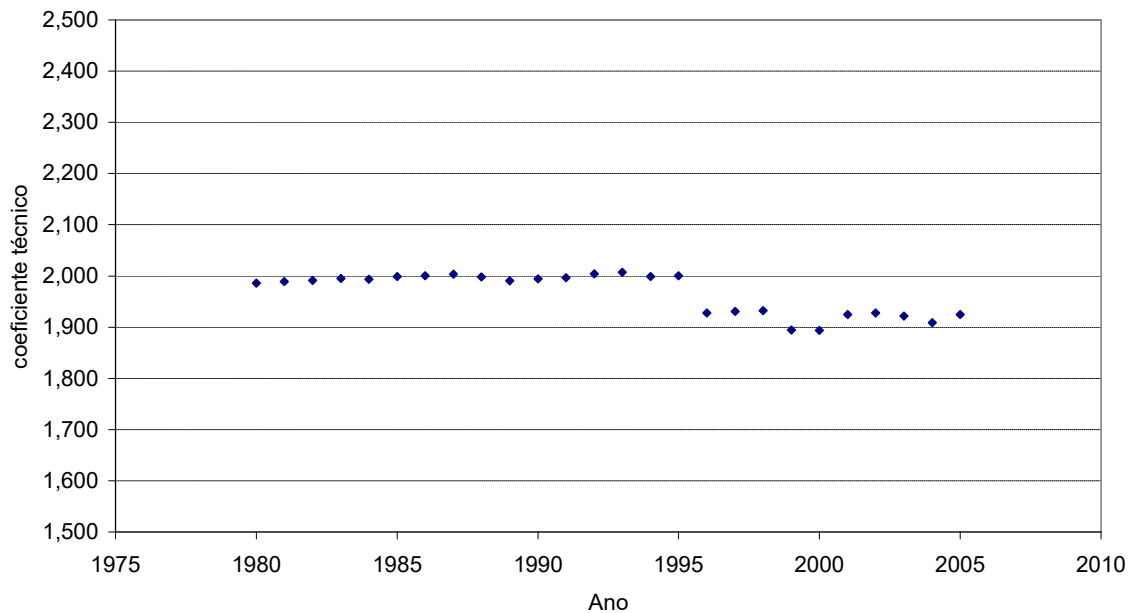
Gás coqueria consumido pela Term_autop-gascoq



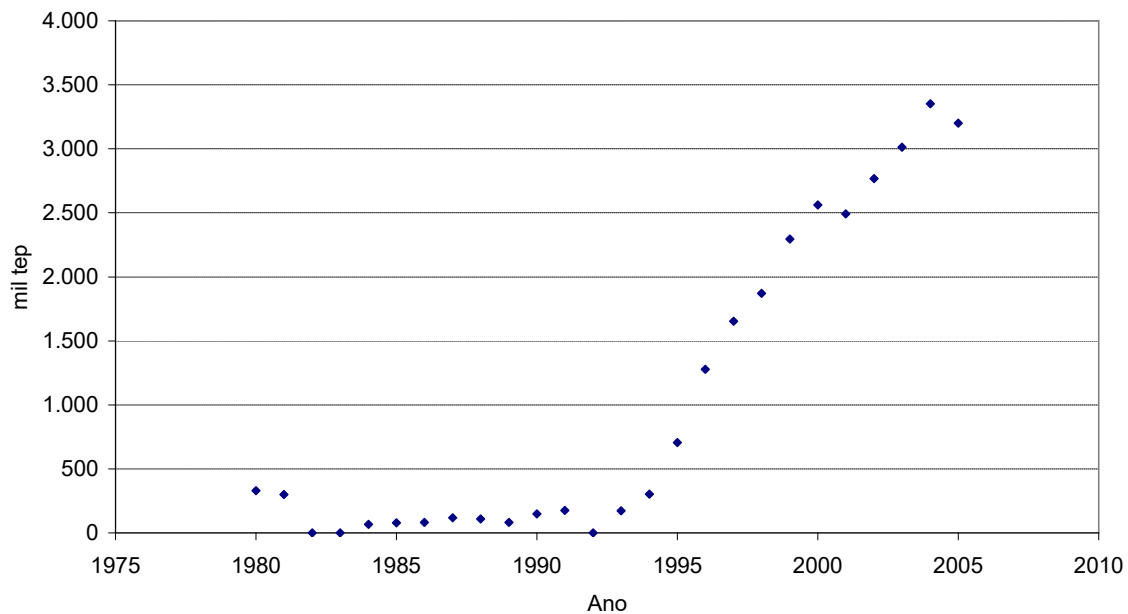
Carvão vegetal produzido na carvoaria



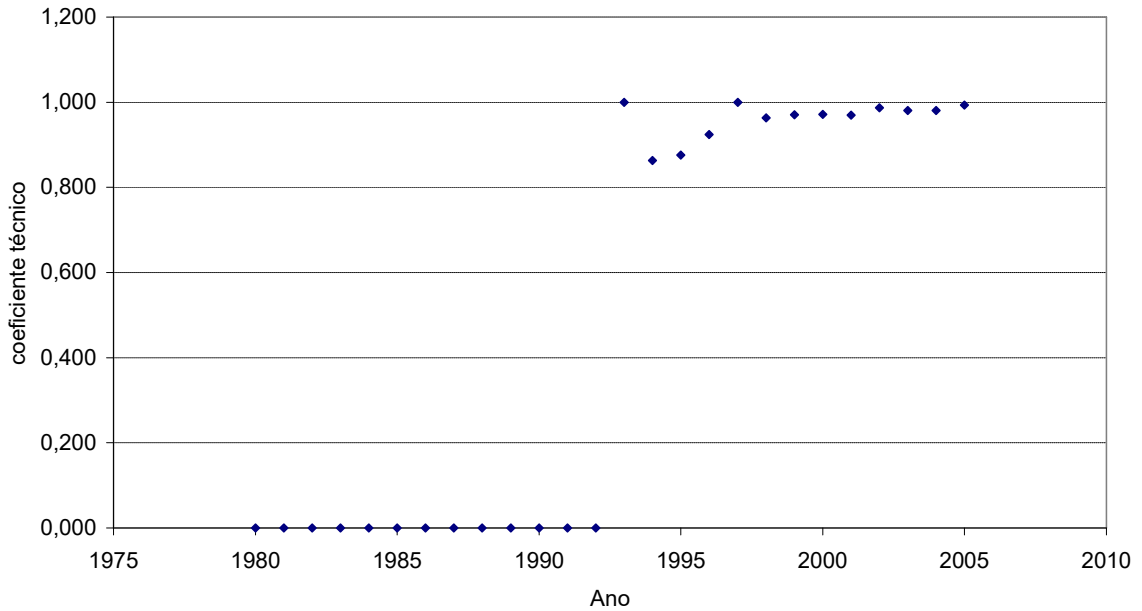
Lenha consumido na carvoaria



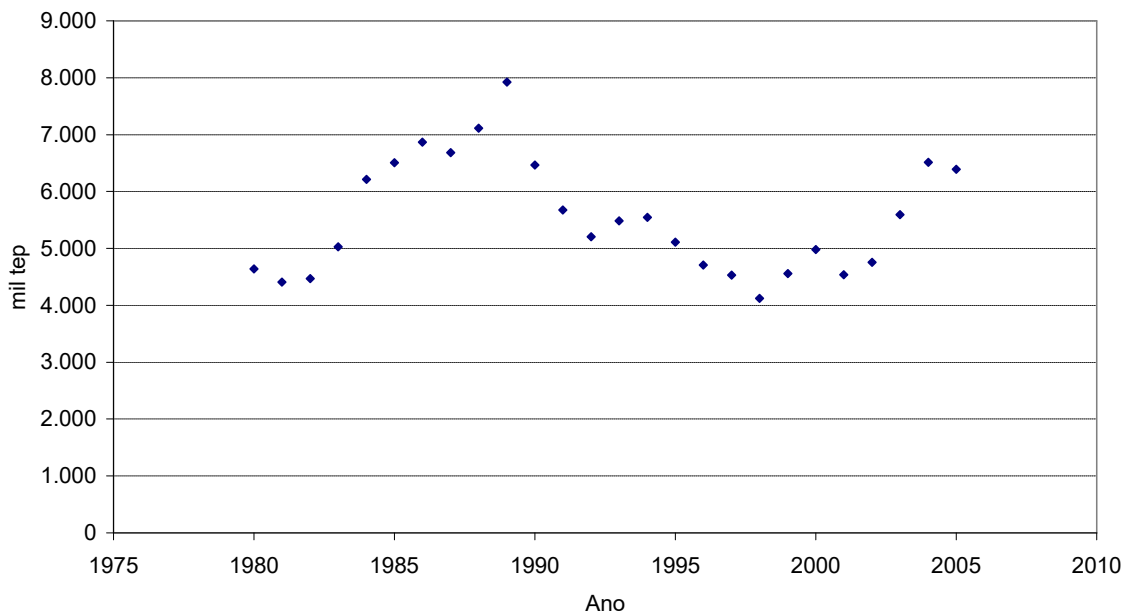
Carvão metalúrgico consumido pela Cmet_PF



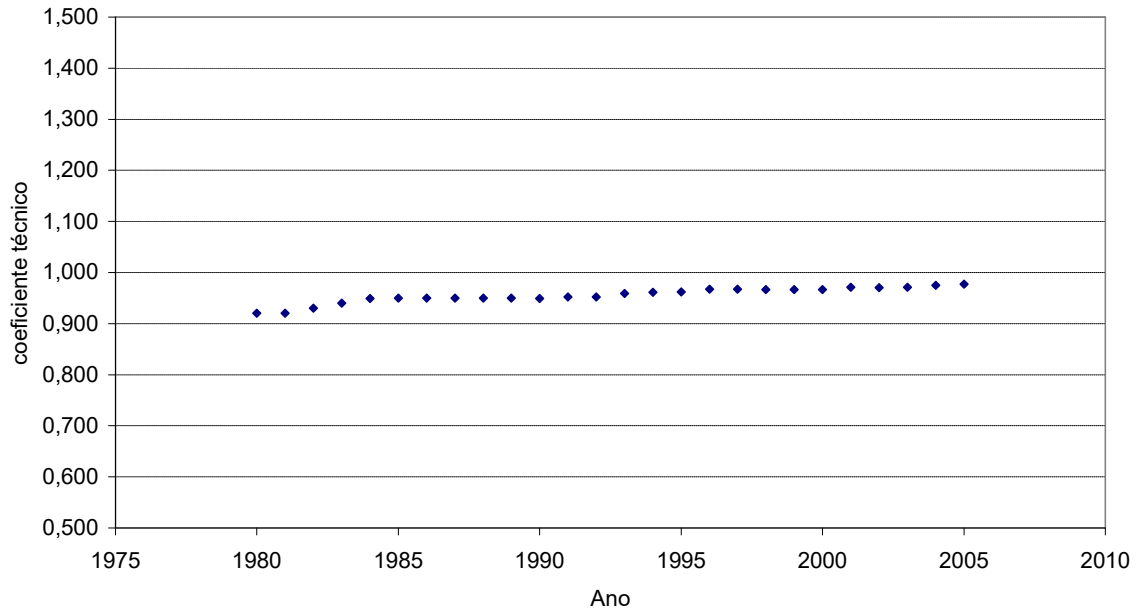
Carvão metalúrgico produzido pela Cmet_PF



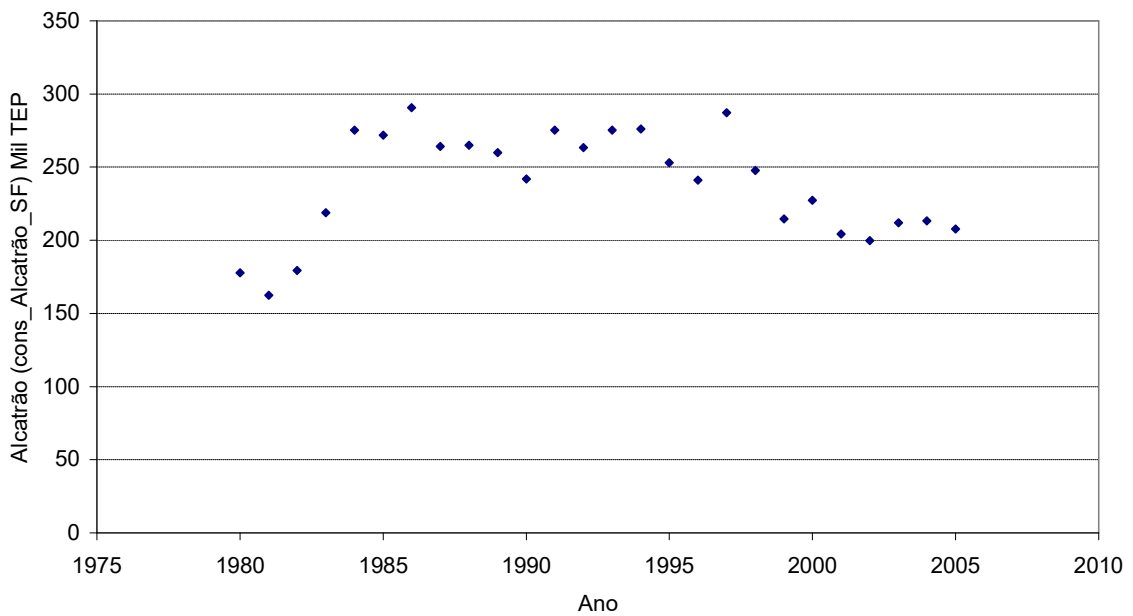
Carvão Vegetal consumido pela Cveg_SF



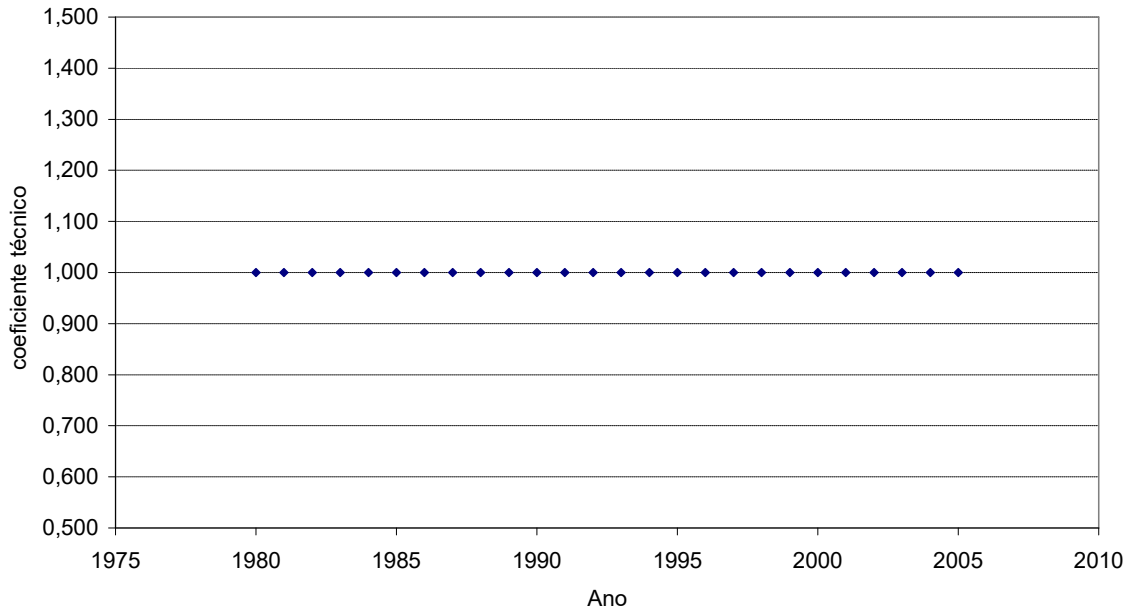
Carvão vegetal produzido Cveg_SF



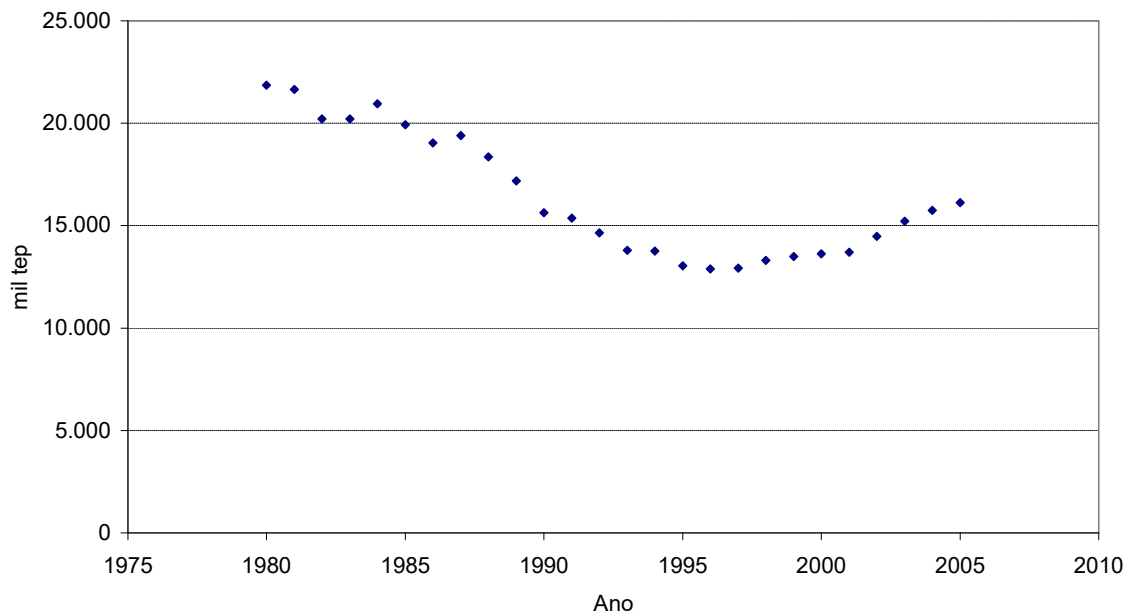
Alcatrão consumido pela Alcatrão_SF



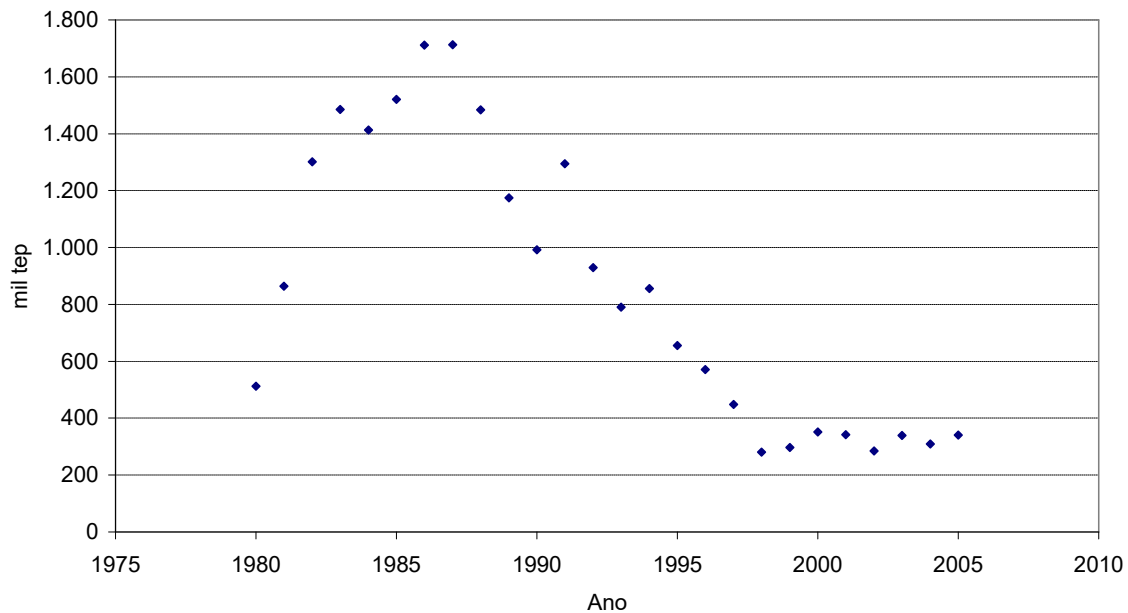
Alcatrão produzido pela Alcatrão_SF



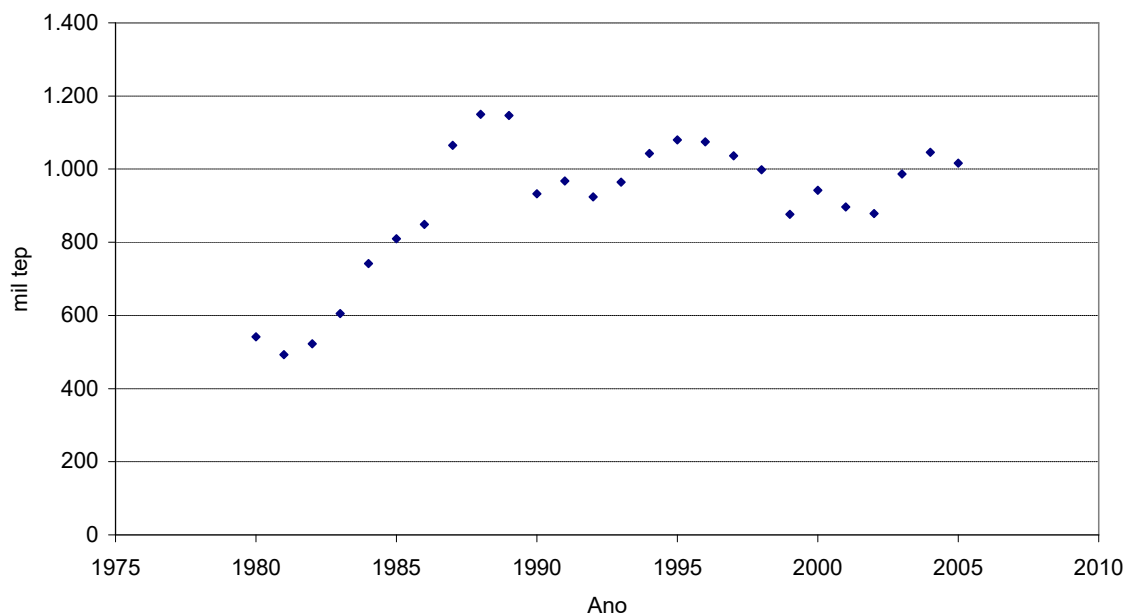
Lenha consumida pela Lenha_PF



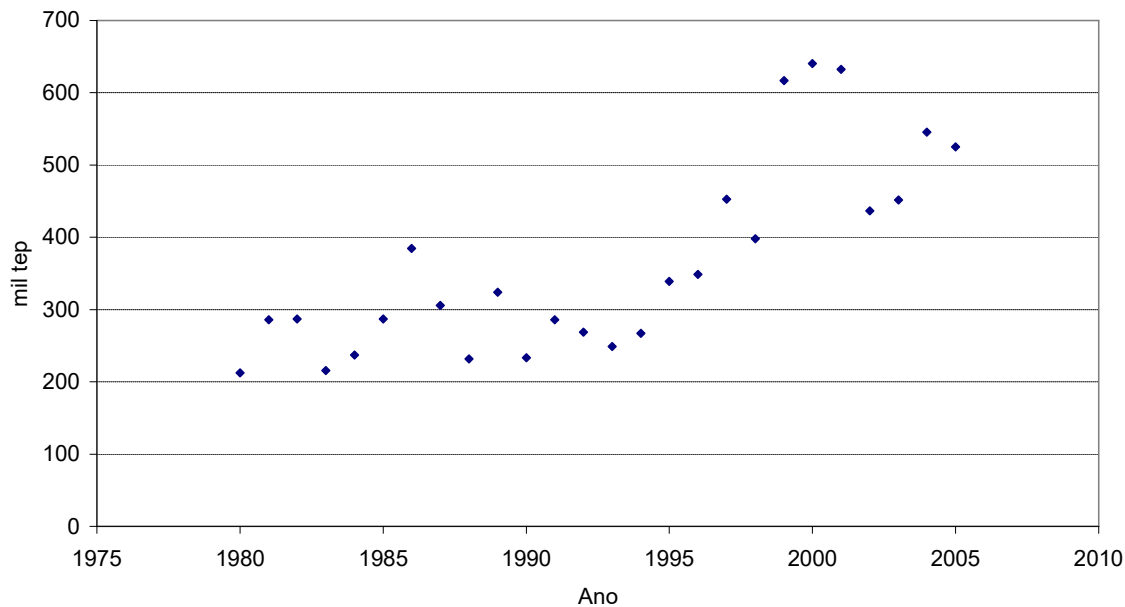
Carvão Vapor consumido pela Cvapor_PF



Gás de coqueria consumido pela Gás coq_SF



Eletricidade consumida pela Eletricidade_SF



8 APÊNDICE C - Fatores sazonais e de patamar (horosazonais)

Os fatores sazonais e de patamar considerados na formulação matemática do modelo MATRIZ tem por objetivo permitir representar a variação da característica operativa que certas tecnologias apresentam ao longo do ano e/ou ao longo do dia, assim como as variações das demandas de energia. No caso brasileiro, com relação à operação, as variações mais significativas são aquelas associadas às tecnologias da cadeia de eletricidade capazes de produzir energia elétrica a partir de fontes renováveis de energia: usinas hidrelétricas, usinas eólicas e cogeração a bagaço de cana de açúcar.

A variabilidade típica da geração hidrelétrica pode ser estimada através dos resultados de simulações com o programa NEWAVE [4]-[5], utilizando a configuração do sistema elétrico referente ao último ano do horizonte do plano decenal de expansão mais recente, ou de outra configuração que possa ser mais próxima da configuração futura esperada para o sistema elétrico brasileiro.

As simulações com o programa NEWAVE usualmente são feitas com 2000 séries sintéticas de vazões afluentes médias mensais, que resultam em 2000 séries de geração hidráulica para cada subsistema, para cada mês do horizonte de tempo considerado. Para obter curvas típicas de geração, as simulações podem ser feitas adotando-se premissas semelhantes às utilizadas para o cálculo da energia garantida: horizonte de estudo de 5 anos, configuração estática e convergência ao risco de déficit de energia de 5%. Com base nos resultados das simulações, as curvas podem ser definidas através de 12 valores, um para cada mês do ano, obtidos pela razão entre a geração média mensal de cada mês e a geração média anual. O fator sazonal FS de uma dada estação é definido pela média dos valores da curva típica de geração correspondente ao período de tempo da estação.

Como exemplo, é ilustrada na Figura C.1 as gerações médias mensais do subsistema Belo Monte ao longo do ano com base nos resultados de uma simulação do programa NEWAVE considerando a configuração estática do ano 2019 do PDE 2019 [21]. Na Figura C.2, são mostrados a curva típica de geração deste subsistema e os fatores sazonais considerando duas estações semestrais com igual duração (6 meses).

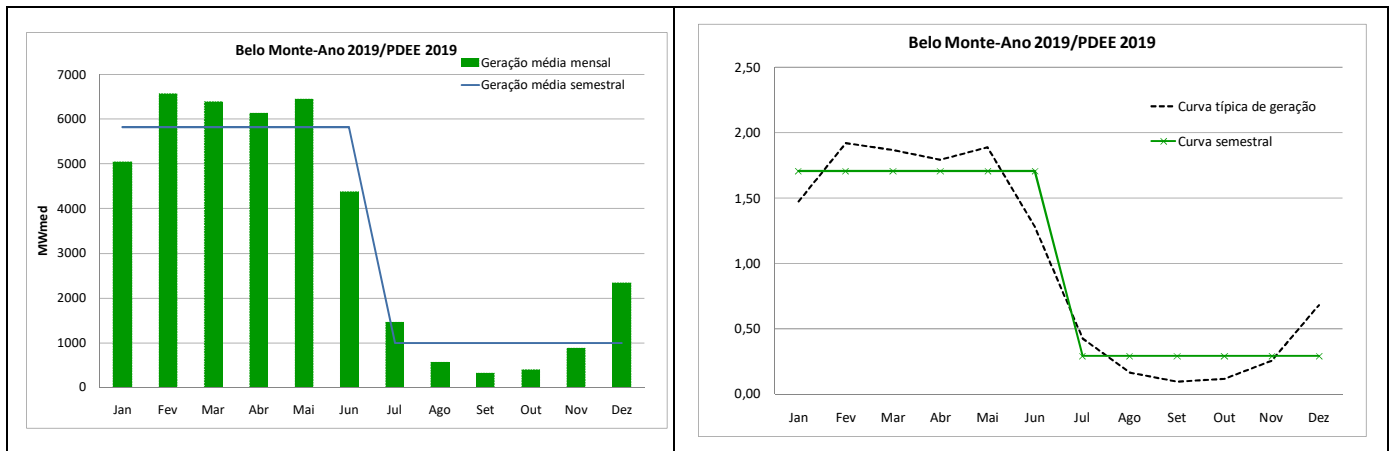


Figura C.: 1-Geração do Subsistema Belo Monte, 2-Curva Típica de Geração

Na Tabela C.1 a seguir são descritos os valores das curvas típicas de geração para todos os subsistemas da configuração considerada.

Tabela C.1. Curva típica de geração hidráulica dos subsistemas elétricos brasileiros- Configuração ano 2019 [21]

Subsistema	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
SE/CO	0,931	0,875	0,906	0,888	0,773	0,890	1,083	1,173	1,179	1,154	1,129	1,019
SUL	0,726	0,765	0,714	0,710	0,811	1,048	1,232	1,244	1,303	1,325	1,208	0,912
NORDESTE	1,081	1,044	1,017	0,984	0,935	0,999	1,093	1,044	0,958	0,882	0,908	1,055
NORTE	1,010	1,077	1,184	1,286	1,307	0,911	0,717	0,821	0,939	0,943	0,841	0,962
ITAIPU	0,867	0,833	0,826	0,813	0,847	0,992	1,143	1,183	1,183	1,175	1,124	1,016
AC/RO	1,424	1,338	1,233	1,259	1,374	1,224	0,845	0,528	0,400	0,476	0,742	1,157
MAN/AP	0,701	0,969	1,160	1,280	1,341	1,352	1,314	1,168	1,021	0,852	0,476	0,365
B.MONTE	1,479	1,924	1,873	1,797	1,892	1,283	0,428	0,164	0,097	0,119	0,258	0,684
TAP/TPIRES	1,339	1,296	1,269	1,322	1,429	1,138	0,643	0,476	0,445	0,576	0,870	1,198

Fazendo uso de uma representação genérica, consideremos f^{sz} e f^l os fatores de sazonalidade e de patamar, tanto para as tecnologias, representando respectivamente os fatores $FTS_i(sz)$ e $FTP_i(l)$ da tecnologia i , como também para as formas de energia representando respectivamente os fatores $FS_j(sz)$ e $FP_j(l)$ da forma de energia j . Considere que $\phi(sz)$ é uma proporção do tempo total T satisfazendo $\sum_{sz=1}^{NZ} \phi(sz) = T$ e $\theta(l)$ é uma proporção do tempo de uma estação sazonal sz qualquer satisfazendo $\sum_{l=1}^L \theta(l) = 1$. De maneira geral, os fatores de sazonalidade devem obedecer a seguinte equação:

$$\sum_{sz=1}^{NZ} f^{sz} \cdot \phi(sz) = 1$$

Assumindo-se que as durações das estações são idênticas então à equação anterior pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{NZ} \cdot \sum_{sz=1}^{NZ} f^{sz} = 1$$

Esta última equação informa que a média dos fatores de sazonalidade deve ser a unidade. Esta equação é válida também para os fatores sazonais das curvas típicas de geração de usinas eólicas e de cogeração à bagaço de cana de açúcar. Entretanto, as curvas típicas destas fontes de geração não podem ser obtidas com base em resultados de simulações do programa NEWAVE por ainda não estarem devidamente representadas neste modelo. Para estas duas fontes, a curva pode ser estimada com base no histórico recente de geração referente às unidades geradoras existentes no atual sistema de geração brasileiro. No caso da cogeração, a produção de energia elétrica ocorre no período da colheita da cana de açúcar, que se estende de maio a outubro de cada ano, enquanto que a geração eólica varia ao longo do ano e também ao longo do dia em função das variações dos ventos. Deve ser ressaltado que a variabilidade dos ventos pode ser distinta de uma região para outra, portanto, devem ser determinadas curvas típicas de geração eólica para cada região geográfica que apresente o mesmo padrão de variabilidade de ventos.

Os fatores de patamar ou horosazonais no modelo MATRIZ resumisse a dois, um referente ao patamar da demanda de ponta e outro referente ao patamar da demanda fora de ponta. Para simplificar a notação consideremos que E_i^k representa a disponibilidade média da tecnologia i no período k . A produção total desta tecnologia em um período k qualquer, ao longo de todas as estações sazonais e patamares de carga, deve ser igual à sua disponibilidade média neste período, de acordo com:

$$\begin{aligned} \sum_{sz=1}^{NZ} \sum_{l=1}^L E_i^k \cdot f^{sz} \cdot f^l \cdot \phi(sz) \cdot \theta(l) &= E_i^k \cdot T \\ \sum_{sz=1}^{NZ} \left[E_i^k \cdot f^{sz} \cdot \phi(sz) \cdot \left(\sum_{l=1}^L f^l \cdot \theta(l) \right) \right] &= E_i^k \cdot T \\ E_i^k \cdot \left(\sum_{l=1}^L f^l \cdot \theta(l) \right) \cdot \left(\sum_{sz=1}^{NZ} f^{sz} \cdot \phi(sz) \right) &= E_i^k \cdot T \\ \sum_{l=1}^L f^l \cdot \theta(l) &= T \cdot \left(\sum_{sz=1}^{NZ} f^{sz} \cdot \phi(sz) \right)^{-1} \end{aligned}$$

Para simplificar a notação suponhamos que as NZ estações sazonais possuem a mesma duração, ou seja, para qualquer estação sz tem-se $\phi(sz) = T / NZ$, suposição esta perfeitamente razoável pois geralmente o ano é dividido em períodos semestrais, quadrimestrais, trimestrais ou bimestrais. Desta forma os fatores de ponta devem satisfazer a seguinte expressão, que a partir de agora será denominada EFP (Equação dos Fatores de Ponta).

$$\sum_{l=1}^L f^l \cdot \theta(l) = 1$$

Note que após definidas as durações de todos os patamares de carga, faz-se necessário adicionar ao sistema $L - 1$ equações lineares para que o mesmo possua solução viável.

Para exemplificar, consideremos um caso com duas estações sazonais com durações idênticas, ou seja, $\phi(1) = \phi(2) = t = T / 2$, e dois patamares de carga, ponta e fora de ponta, satisfazendo $\theta(p) = x$ e $\theta(fp) = 1 - x$. A Figura 2 apresenta a produção de uma dada tecnologia i ao longo das estações e patamares deste exemplo.

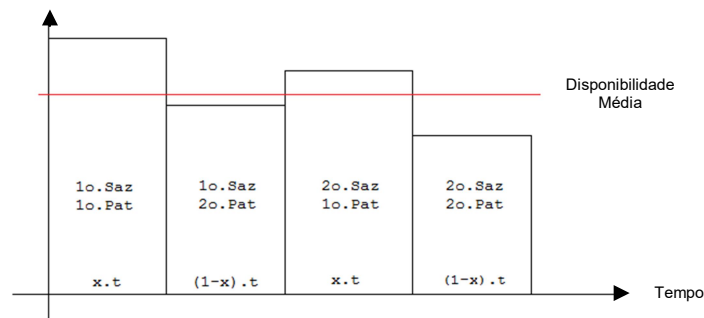


Figura 2. Produção nas estações sazonais e patamares de carga

Procedendo-se com o cálculo dos fatores de ponta e fora de ponta, obtém-se:

$$f_i^p \cdot x + f_i^{fp} \cdot (1 - x) = 1$$

Observando-se a equação anterior, podemos deduzir que se uma dada tecnologia possuir a mesma disponibilidade na ponta e fora de ponta, ou seja, $f_i^p = f_i^{fp} = 1$, fato que acontece, por exemplo, com as hidrelétricas, qualquer subdivisão do tempo é válida pois a equação anterior torna-se trivialmente satisfeita. No entanto, quando se trata de tecnologias com disponibilidades diferentes na ponta e fora de ponta, como no caso de eólicas ou solar, os fatores devem ser calculados com base na subdivisão do tempo adotada.

A obtenção dos fatores de patamar de carga pode ser obtida através da EFP para todos os patamares de carga, fazendo-se uso, por exemplo, de dados experimentais que nos informem a

relação existente entre as produções nos diversos patamares de carga. Para tornar a análise mais intuitiva iremos considerar a EFP do caso apresentado anteriormente, com dois patamares de carga, ponta e fora de ponta.

Suponham-se duas hipóteses. Na primeira o fator de ponta é superior ao fator fora de ponta, caso das usinas eólicas, na segunda a situação é inversa, caso das usinas solares fotovoltaicas ou heliotérmicas (CSP – Concentrated Solar Power).

1a. Hipótese:

Dividindo-se a EFP por $f_i^{fp} \cdot x$ obtemos a seguinte relação:

$$\frac{f_i^p}{f_i^{fp}} + \frac{(1-x)}{x} = \frac{1}{f_i^{fp} \cdot x} \rightarrow \frac{f_i^p}{f_i^{fp}} = 1 + \frac{1}{x} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{f_i^{fp}} - 1 \right)}_{\Delta}$$

O parâmetro Δ quantifica o quão maior é f_i^p em relação à f_i^{fp} e pode ser inferido de forma aproximada com base, por exemplo, em observações de campo comparando-se a produção na ponta e fora de ponta, em um mesmo intervalo de tempo:

$$\frac{f_i^p}{f_i^{fp}} = \frac{y_{i,z}^k(p,sz)}{y_{i,z}^k(fp,sz)} = \frac{E_i^k \cdot f_i^z \cdot f_i^p \cdot \phi(z) \cdot \hat{\theta}(p)}{E_i^k \cdot f_i^z \cdot f_i^{fp} \cdot \phi(z) \cdot \hat{\theta}(fp)}$$

Nesta última expressão os parâmetros $\hat{\theta}(p)$ e $\hat{\theta}(fp)$ são idênticos e representam a duração de cada medição experimental na curva de carga. De posse do parâmetro Δ o fator fora de ponta pode ser inferido, e conseqüentemente o fator de ponta, pois $f_i^p = (1 + \Delta) \cdot f_i^{fp}$, através da equação:

$$f_i^{fp} = \frac{1}{x \cdot \Delta + 1}$$

Tomando-se como exemplo a média das gerações horárias no estado do Rio Grande do Sul no mês setembro de 2016 [22], observações de campo indicam que $\Delta = 0,16$ e considerando-se a duração da ponta de 3,6 horas, ou seja, 15% do tempo, obtemos $f_i^p = 1,13$ e $f_i^{fp} = 0,97$.

2a. Hipótese:

Dividindo-se agora a EFP por $f_i^P \cdot (1-x)$ obtemos a seguinte relação:

$$\frac{x}{(1-x)} + \frac{f_i^{fp}}{f_i^P} = \frac{1}{f_i^P \cdot (1-x)} \rightarrow \frac{f_i^{fp}}{f_i^P} = \frac{1}{(1-x)} \cdot \underbrace{\left(\frac{1}{f_i^P} - x \right)}_{\Delta+1}$$

De forma análoga a hipótese anterior, o parâmetro Δ quantifica o quão maior é f_i^{fp} em relação à f_i^P . Após definido este parâmetro o fator de ponta pode ser inferido, e consequentemente o fator fora de ponta pois $f_i^{fp} = (1+\Delta) \cdot f_i^P$, através da equação:

$$f_i^P = \frac{1}{x + (1-x) \cdot (\Delta + 1)}$$

Supondo-se que, no caso das usinas solares, a geração fora da ponta seja 90% maior do que aquela no horário de ponta, temos que $\Delta = 0,90$ e considerando-se a duração da ponta de 3,6 horas, ou seja, 15% do tempo, obtemos $f_i^P = 0,57$ e $f_i^{fp} = 1,08$.