



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL NA GERAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

FLÁVIO AUGUSTO BARRELLA

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações.**

**Orientador:
Prof. Dr. GORO HIROMOTO**

São Paulo
2011



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL NA GERAÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA**

FLÁVIO AUGUSTO BARRELLA

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações.**

**Orientador:
Prof. Dr. GORO HIROMOTO**

São Paulo
2011

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à:

Dora e Lourenço (*in memorium*)

Xyko

Mirela

Carmen

Raul

Por ser esta a ordem em que entraram em minha vida!

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Goro Hiromoto, pela sua majestosa orientação;

Aos Professores Doutores Luiz Antonio Mai, Álvaro Luiz Guimarães Carneiro, Roberto Vicente e Orlando Rodrigues Jr., pelas valorosas sugestões tanto na Qualificação quanto no Seminário de Área;

Ao IPEN, por ter me dado a oportunidade de desenvolver este trabalho;

À minha família, a qual se privou de tantas coisas, para que eu pudesse atingir meus objetivos;

Aos colegas de trabalho, que me ajudaram em momentos críticos e

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“Tudo que é, é, ou em si ou em outra coisa.”

Spinoza (Ética)

“O homem é o que ele é.”

Sigmund Freud (O Ego e o Id)

“A tecnologia deveria ser utilizada como seletor da qualidade de vida e não como acelerador do ritmo de vida.”

Flávio Barrella

FERRAMENTA PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

FLÁVIO AUGUSTO BARRELLA

RESUMO

A produção de energia elétrica é intimamente vinculada ao seu consumo. Ela acompanha o consumo, pois os processos de produção não armazenam energia e o ponto ótimo se dá quando não se tem nem excesso nem falta da quantidade de energia produzida em relação à consumida. Por sua vez, o consumo de energia elétrica está relacionado ao padrão de crescimento e desenvolvimento da nação. Inúmeras evidências, associando o consumo de energia elétrica ao produto interno bruto e outros índices de desenvolvimento, são encontrados na literatura, os quais mostram claramente esta justa correlação.

Por outro lado, o total de energia elétrica produzida é o resultado da soma das produções individuais das diversas fontes de recursos, tais como: gás natural, carvão vapor, hídricas, produtos de cana, eólica e urânio. Este é um cenário típico de produtores e consumidores, em que os produtores concorrem, entre si, para suprir a demanda. Qualquer variação na produção de um é compensada pela produção dos outros, a fim de se manter a demanda atendida na exata medida de suas necessidades.

Neste trabalho foram desenvolvidas uma metodologia original e uma ferramenta de simulação, no aplicativo MATLAB®, e estabelecidos parâmetros e indicadores ambientais para auxiliar a tomada de decisões quanto ao direcionamento de investimentos na área de produção de energia elétrica, mostrando como minimizar os efeitos nocivos ao meio ambiente e acompanhar o crescimento da demanda simultaneamente. São utilizadas técnicas e metodologias consagradas, tais como a Avaliação do Ciclo de Vida, a Contabilidade Energética, a Análise Estatística, a Teoria de Sistemas sobre a base de dados oficial do governo brasileiro, isto é, a matriz 27x47 do relatório anual Boletim Energético Nacional (BEN) do Ministério das Minas e Energia (MME), fornecendo uma visão holística e otimizada do setor energético nacional e em particular da área de energia elétrica.

Alguns temas polêmicos como o efeito da utilização da área florestal para a produção de energia elétrica e o esgotamento de reservas energéticas são discutidos no final deste trabalho.

Palavras chave: ACV, Energia, BEN, Matriz Energética.

A TOOL FOR ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE IN ELECTRICITY GENERATION

FLÁVIO AUGUSTO BARRELLA

ABSTRACT

The production of electricity is closely linked to its consumption. It follows the consumption, because the production processes do not stock up energy and the optimum point is when it does not have over or less quantity of energy produced according to its consumption. In turn, energy consumption is related to the level of growth and development of the nation. A lot of evidence associating energy consumption to gross domestic product and other development indicators are found in the literature, which clearly shows this correlation.

On the other side, there are several sources of resources from which is produced electric power, such as: natural gas, steam coal, hydro, sugarcane waste, wind and uranium in amounts that together supply the need consumption required all the time and could supply more than the required amount. This presented scenario is a typical example of producers and consumers, where producers compete to supply demand, and any variation in one of them is offset by the production of others, in order to get demand attended in the exact extent of their needs.

In this work were developed a methodology and a tool, and also parameters were set to help decision making regarding guidelines for investments in the production of electricity, directing to minimize harm to the environment and at the same time meet the growing of the demand. Techniques and traditional methods were used, such as Life Cycle Assessment, Emergy Accounting, Statistical Analysis, the System Theory on the official database of the Brazilian government, that is, the 27x47 matrix of the Annual Report National Energy Bulletin (BEN) of Ministry of Mines and Energy (MME), providing an holistic and optimized overview in the energy national sector and in particular the electric power sector.

Some controversial issues as the effect of using the forest for the production of electricity and the depletion of energetic reserves are discussed at the end of this work.

Keywords: LCA, Emergy, BEN, Energy Matrix.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO.....	19
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	19
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	19
1.2	DELIMITAÇÃO DO ASSUNTO.....	19
1.3	ABRANGÊNCIA DO ESTUDO.....	20
1.3.1	<i>Abrangência Temporal</i>	20
1.3.2	<i>Abrangência Geográfica</i>	20
1.3.3	<i>Abrangência de Aplicação</i>	21
1.3.4	<i>Considerações sobre a Abrangência</i>	21
1.3.5	<i>Análises e discussões não contempladas por este estudo</i>	21
2	METODOLOGIA	22
2.1	ESCOLHA DOS INSTRUMENTOS DE ANÁLISE.....	22
2.1.1	<i>O BEN – Balanço Energético Nacional</i>	23
2.1.1.1	Unidade Funcional utilizada no BEN.....	24
2.1.1.2	Descrição das linhas e colunas da matriz 27x47.....	25
2.1.2	<i>A Análise do Ciclo de Vida (ACV)</i>	29
2.1.3	<i>A Contabilidade Emergética</i>	29
2.1.3.1	Energia.....	30
2.1.3.2	Transformidade.....	30
2.1.3.3	Fontes de Recursos.....	32
2.1.3.4	Índices Emergéticos.....	33
2.1.3.5	Índices Agregados.....	37
2.1.4	<i>A Teoria de Sistemas</i>	38
2.1.5	<i>A Correlação de Pearson</i>	39
2.2	ESCOLHA DAS FONTES DE RECURSOS A SEREM UTILIZADAS.....	45
2.2.1	<i>Oferta Interna Bruta do Gás Natural – OIB(gn)</i>	48
2.2.2	<i>Oferta Interna Bruta do Carvão Vapor – OIB(cv)</i>	49
2.2.3	<i>Oferta Interna Bruta de Energia Hídrica – OIB(eh)</i>	49
2.2.4	<i>Oferta Interna Bruta dos Produtos de Cana – OIB(pc)</i>	50
2.2.5	<i>Oferta Interna Bruta da Energia Eólica – OIB(ee)</i>	51
2.2.6	<i>Oferta Interna Bruta da Energia Nuclear – OIB(en)</i>	51
2.2.7	<i>Transformidades das Fontes de Recursos</i>	52
2.2.8	<i>Análise de sensibilidade</i>	53
2.2.9	<i>Tipos de Recursos</i>	65
2.3	ESTUDOS DINÂMICOS.....	68

2.4	A FERRAMENTA.....	70
2.4.1	<i>Subsistema Reservas</i>	74
2.4.2	<i>Subsistema Extração-Produção</i>	77
2.4.3	<i>Subsistema Consumo</i>	79
2.4.4	<i>Subsistema Absorção</i>	80
2.4.5	<i>Subsistema Recuperação</i>	82
2.4.6	<i>Subsistema Matriz de Influência</i>	84
2.4.7	<i>Subsistema Energia Corrigida</i>	85
2.4.8	<i>Subsistema de Obtenção dos Índices Emergéticos</i>	86
2.4.9	<i>Cálculo dos valores e gráficos de simulações</i>	91
2.4.10	<i>Sistema Auto-Regulado</i>	93
2.5	EQUACIONAMENTO PROPOSTO	99
3	RESULTADOS	101
3.1	VERIFICAÇÃO DO MODELO	101
3.2	COMPORTAMENTO DO MODELO COM PERTURBAÇÕES	103
3.2.1	<i>Comportamento com perturbações de curto prazo</i>	103
3.2.2	<i>Comportamento do modelo com perturbações de médio prazo</i>	106
3.3	OBTENÇÃO DOS ÍNDICES COM E SEM PERTURBAÇÕES.....	113
3.3.1	<i>Índices: sem Perturbação</i>	115
3.3.2	<i>Índices: Perturbação na fonte de Gás Natural</i>	116
3.3.3	<i>Índices: Perturbação na fonte de Carvão Vapor</i>	117
3.3.4	<i>Índices: Perturbação na fonte de recursos Hídricos</i>	118
3.3.5	<i>Índices: Perturbação na fonte de recursos Produtos de Cana</i>	119
3.3.6	<i>Índices: Perturbação na fonte de recursos Eólica</i>	120
3.3.7	<i>Índices: Perturbação na fonte de recursos Nucleares</i>	121
3.3.8	<i>Índices: Perturbação combinada Hídrica e Nuclear 1</i>	122
3.3.9	<i>Índices: Perturbação combinada Hídrica e Nuclear 2</i>	123
3.4	COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES	124
3.5	SIMULAÇÕES COM ÍNDICES AGREGADOS	124
3.5.1	<i>Índices Agregados Médios: sem Perturbação</i>	125
3.5.2	<i>Índices Agregados Médios: Perturbação na fonte de Gás Natural</i>	125
3.5.3	<i>Índices Agregados Médios: Perturbação na fonte de Carvão Vapor</i>	126
3.5.4	<i>Índices Agregados Médios: Perturbação na fonte de recursos Hídricos</i>	127
3.5.5	<i>Índices Agregados Médios: Perturbação na fonte de Produtos de Cana</i>	127
3.5.6	<i>Índices Agregados Médios: Perturbação na fonte de recursos Eólica</i>	128
3.5.7	<i>Índices Agregados Médios: Perturbação na fonte de recursos Nucleares</i>	129
3.6	OUTRAS SIMULAÇÕES.....	129
3.6.1	<i>Detalhamento no Gás Natural</i>	129

3.6.2	<i>Índices Agregados Médios: Gás Natural com Reserva Ilimitada</i>	132
3.6.3	<i>Recursos Hídricos e de Produtos de Cana</i>	134
3.6.3.1	Recursos Hídricos.....	135
3.6.3.2	Produtos de Cana	137
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	140
4.1	ANÁLISE DA VERIFICAÇÃO DO MODELO.....	140
4.2	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO MODELO COM PERTURBAÇÕES	141
4.3	ANÁLISE DA OBTENÇÃO DOS ÍNDICES COM E SEM PERTURBAÇÕES.....	142
5	CONCLUSÃO	145
6	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE DO TRABALHO	146
6.1	MATRIZ DE INFLUÊNCIA	146
6.2	ABRANGÊNCIA DE APLICAÇÃO	146
6.3	ABRANGÊNCIA GEOGRÁFICA	146
6.4	AMPLIAÇÃO DE CAPACIDADE DA FERRAMENTA	146
6.5	NOVOS ÍNDICES.....	147
6.6	INTERFACE HOMEM-MÁQUINA - IHM	147
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	148
	APÊNDICE A – SENSIBILIDADE DOS ÍNDICES EYR, ELR E EIS EM RELAÇÃO À F	152
	APÊNDICE B – SIMULAÇÕES ÍNDICES AGREGADOS	155
	ANEXO A – ANEXO E DO CAPÍTULO 9 DO BEN2005	189
	ANEXO B – CÁLCULOS DAS COMPONENTES EMERGÉTICAS	195

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

