

## OS CENÁRIOS DA UTILIZAÇÃO DA ENERGIA SOLAR NO BRASIL NO HORIZONTE 1990

João Luiz Fonseca dos Santos\*

### RESUMO

Neste artigo propõe-se um estudo do desenvolvimento da energia solar, no caso brasileiro, como um elemento complementar à produção energética existente e em certas regiões nacionais como um vetor energético indispensável.

Este trabalho consiste na elaboração de uma série de hipóteses relativas a técnicas solares existentes e susceptíveis de conter elementos portadores de futuro, cuja base de concepção seja mais credível.

O ponto de partida da construção de um cenário é geralmente o presente, e é constituído, segundo a definição de Jantsch, "por uma ocorrência hipotética de eventos construídos, procurando-se ressaltar os encadeamentos causais e nós de decisão. No entanto, no caso da energia solar, a construção de cenários a partir do presente, como forma exploratória do futuro, seria de pouca utilidade, porque a maioria das aplicações de energias solares no Brasil permanece no estado experimental. Conseqüentemente, os cenários são elaborados a partir de uma imagem futura, tendo em conta as tendências mais prováveis, ou seja, integrando vários instrumentais de previsão utilizados no artigo.

Este estudo privilegia o duplo caráter exploratório e normativo do cenário. Dentro desta abordagem o método de impactos cruzados parece ser especialmente indicado para aumentar o nível de precisão das probabilidades atribuídas aos cenários escolhidos.

---

(\*) Universidade Federal da Paraíba. Mestrado de Economia.

## ABSTRACT

It is proposed that solar energy be a complementary part of Brazil's energy development framework. Actually, it may be the only available alternative for certain Brazilian regions.

This study consists of the development of a series of hypotheses related to the use existing foreign solar techniques in Brazil.

Generally, the present is the point of departure in the construction of "scenarios" defined by Jantsch as "the hypothetical occurrence of events, built to point out chains of causation and decision knots".

In the case of solar energy, the construction of scenarios starting from the present, as a classic way of exploring the future, would be of minor service due to the fact that most practical utilizations of solar energy in Brazil are still at the experimental stage.

Consequently, this article suggests that construction of scenarios based not in the present but on tendencies, produced by integrating various forecasting methods which have been used in the study.

A double approach of exploratory and normative scenarios is emphasized in this study. Within this approach the method of crossed impacts appears to be especially suitable to increase the level of precision of the probabilities assigned to the chosen scenarios.

## 1. INTRODUÇÃO

A finalidade deste trabalho é apresentar os resultados da aplicação do Método dos Impactos Cruzados (M.I.C.) à utilização da energia solar no Brasil, no horizonte 1990. Este método que permite calcular a probabilidade de realização de diferentes eventos, levando em conta suas interações, fornece três tipos de resultados:

- a) obtenção de uma informação coerente sobre os eventos que poderiam influenciar a evolução da utilização da energia solar;
- b) a elaboração e hierarquização dos cenários possíveis;
- c) a realização da análise de sensibilidade, evidenciando as interações entre os eventos.

Este método aparece portanto como um instrumento poderoso para determinar as implicações possíveis das alternativas energéticas e a influência dos eventos exteriores sobre estas políticas energéticas. Tornar-se-á um elemento importante do método prospectivo, ainda por elaborar.

## 2. ELABORAÇÃO DOS CENÁRIOS DECORRENTES DAS TENDÊNCIAS MAIS PROVÁVEIS

### 2.1. Definição do cenário

A base da construção de um cenário é, geralmente, o presente e aparece, segundo a definição de JANTSCH [1] como "séries hipotéticas de eventos construídos para evidenciar as ligações de causa e os nós de decisão". No entanto, no caso da Energia Solar, a construção de cenário, a partir do presente, forma clássica de exploração do futuro, seria de pouca utilidade, uma vez que a maioria das aplicações da Energia Solar, em forma industrial, só existe no Brasil, em nível experimental. Tivemos, portanto, que elaborar cenários a partir de uma imagem futura, levando em conta as tendências

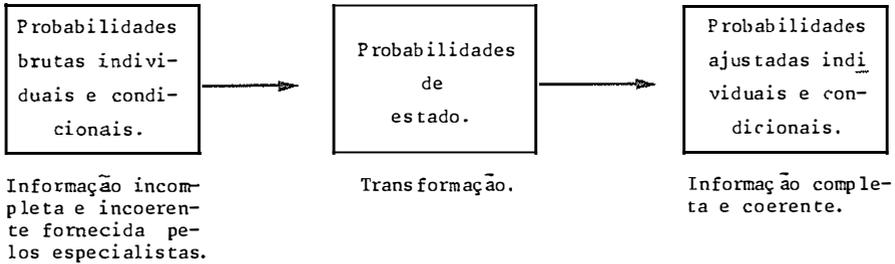
mais prováveis, ou seja, integrando diversos instrumentos de previsão. O cenário transforma-se então, segundo JANTSCH, numa "série hipotética de acontecimentos que podem conduzir, plausivamente, a uma situação determinada". O critério de apreciação continua sendo o da plausibilidade das ligações, como para qualquer cenário, mas, por outra parte, é necessário que estas ligações sejam aptas a conduzir à situação final, e, que esta situação seja útil às decisões atuais.

Para determinação dos cenários realizáveis e avaliação das suas probabilidades, conservaremos aqui as três grandes vias possíveis de conversão da energia solar, definidas em estudo anterior [2], ou seja a utilização das grandes potências de conversão em sistema misto (energia convencional associada à produção solar) e a utilização de pequenas potências (produção de calor a baixa temperatura, energia elétrica de baixa potência, bomba d'água, etc...).

Após coleta das opiniões de um conjunto de especialistas, sobre a probabilidade de utilização do sol, tentaremos pôr em relação as opiniões expressas pelos especialistas e as interdependências existentes entre as questões propostas. No intuito de agregar as variáveis e estabelecer as interdependências das relações, utilizaremos o método das Matrizes de Impactos Cruzados. O preenchimento dos questionários por parte dos especialistas apresenta-se já no seu quadro bruto probabilitístico, pois a informação foi recolhida através de uma aplicação do método "Delphi" [3].

O método dos impactos (M.I.C.) é o termo genérico de uma família de técnicas, que tenta avaliar as mudanças das probabilidades do surgimento de um conjunto de eventos em função do surgimento de um deles. Este método apresenta-se, de início, sob a forma de uma lista de eventos com probabilidades individuais dadas por um grupo de especialistas [4]. A hipótese de base deste método, é que as probabilidades levam em consideração as interações, mas incompletamente. A consideração sistemática do conjunto dessas interdependências entre eventos permite passar de um sistema de probabilidades corrigidas. Existem, para resolução dessas questões, diferentes métodos, mas a obtenção dos resultados permanece complexa e ligada à subjetividade do emprego de coeficientes de ponderação individuais.

Para nosso estudo, seguimos, em parte, o método SMIC 74 (Systèmes et Matrices d'Impacts Croisés) definido por Duperrin e Godet [5]. O método visa o controle e a coerência das estimações dos especialistas em relação às restrições.



2.2. A Escolha dos Cenários

Basearemos nosso estudo sobre três eventos importantes suscetíveis de se produzirem no período 1975-90 em relação à utilização de Energia Solar em forma industrial:

- utilização das grandes potências de conversão num sistema exclusivamente solar ( $e_1$ );
- utilização das grandes potências de conversão num sistema misto ( $e_2$ );
- utilização das pequenas potências de conversão sobre o setor de utilização ( $e_3$ ).

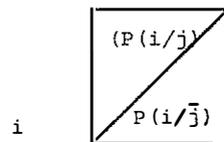
O quadro abaixo traduz as opiniões recolhidas junto ao grupo de especialistas.

$e_1$	0,2
$e_2$	0,4
$e_3$	0,7

Probabilidades individuais.

	$e_1$	$e_2$	$e_3$
$e_1$	0,2	0,7	0,4
$e_2$	0,8	0,4	0,5
$e_3$	0,9	0,9	0,7

Probabilidades condicionais.



## 3. ANÁLISE ESTRATÉGICA DOS CENÁRIOS

3.1. As Probabilidades Condicionais dos EventosConsiderados 2 a 2

$P(i)$  - representa a probabilidade de  $e_i$  realizar-se no período 1975-90;

$P(i|j)$  - a probabilidade de  $e_i$  realizar-se, sabendo que  $e_j$  já se realizou no mesmo período;

$P(i|\bar{j})$  - a probabilidade de  $e_i$  realizar-se sabendo que  $e_j$  não se produziu no mesmo período.

Estas probabilidades "a priori" são modificadas, de modo satisfatório, pelas seguintes equações:  $0 \leq p \leq 1$

$$1) P(i|j) \cdot P(j) = P(j|i) \cdot P(i) = P(i \cdot j),$$

$$2) P(i|j) \cdot P(j) + P(i|\bar{j}) \cdot P(\bar{j}) = P(i)$$

Esse sistema de três eventos, isolados, pode tomar 8 estados no horizonte, que se podem associar às probabilidades.

$E_1 = (e_1, e_2, e_3)$  associado a uma probabilidade  $\pi_1$ .

$E_2 = (\bar{e}_1, e_2, e_3)$  associado a uma probabilidade  $\pi_2$ .

$E_3 = (e_1, \bar{e}_2, e_3)$  associado a uma probabilidade  $\pi_3$ .

3)  $E_4 = (e_1, e_2, \bar{e}_3)$  associado a uma probabilidade  $\pi_4$ .

Estados  $E_5 = (\bar{e}_1, \bar{e}_2, e_3)$  associado a uma probabilidade  $\pi_5$ .

$E_6 = (\bar{e}_1, e_2, \bar{e}_3)$  associado a uma probabilidade  $\pi_6$ .

$E_7 = (e_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3)$  associado a uma probabilidade  $\pi_7$ .

$E_8 = (\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3)$  associado a uma probabilidade  $\pi_8$ .

$$\text{com } \sum_{k=1}^8 \pi_k = 1.$$

## 3.1.1. Expressão das Probabilidades Individuais em Função das Probabilidades de Estado

4)

$$P(i) = \sum_{k=1}^{k=8} \pi_{ik} \pi_k$$

com

$0_{ik} = 1$  se  $e_i$  figura em  $E_k$

$0_{ik} = 0$  se  $e_i$  não figura em  $E_k$ .

3.1.2. Expressão das Probabilidades Condicionais

5) 
$$\forall (ij) P(i|j) = \frac{\sum_{k=1}^r t_{(ijk)} \pi_k}{P(j)}$$

Para  $r = 1, 2, 3$ .

6) 
$$\forall (ij) P(i|j) = \frac{\sum_{k=1}^r S_{ijk} \pi_k}{1 - P(j)}$$

Para  $r = 1, 2, 3$ .

com  $t_{(ijk)} = 1$  se  $e_i$  e  $e_j$  figuraram em  $E_k$ .

$t_{(ijk)} = 0$  se  $e_i$  e  $e_j$  não figuraram em  $E_k$ .

$s_{(ijk)} = 1$  se  $e_i$  e  $\bar{e}_j$  figuram em  $E_k$ .

$s_{(ijk)} = 0$  se  $e_i$  ou  $\bar{e}_j$  não figuram em  $E_k$ .

3.1.3. Matriz das Probabilidades Condicionais

Obtemos:

$P_1 = \pi_1 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_7$	$P_{1/2} = \frac{\pi_1 + \pi_4}{P_2}$ $P_{1/2} = \frac{\pi_3 + \pi_7}{1 - P_2}$	$P_{1/3} = \frac{\pi_4 + \pi_3}{P_3}$ $P_{1/3} = \frac{\pi_4 + \pi_7}{1 - P_3}$
$P_{2/1} = \frac{\pi_1 + \pi_4}{P_1}$ $P_{2/1} = \frac{\pi_2 + \pi_6}{1 - P_1}$	$P_2 = \pi_1 + \pi_2 + \pi_4 + \pi_6$	$P_{2/3} = \frac{\pi_1 + \pi_2}{P_3}$ $P_{2/3} = \frac{\pi_1 + \pi_6}{1 - P_3}$
$P_{3/1} = \frac{\pi_1 + \pi_3}{P_1}$ $P_{3/1} = \frac{\pi_2 + \pi_5}{1 - P_1}$	$P_{3/2} = \frac{\pi_1 + \pi_2}{P_2}$ $P_{3/2} = \frac{\pi_3 + \pi_5}{1 - P_2}$	$P_3 = \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_5$

### 3.2. Resolução pela Aplicação do Algoritmo de LEMKE

Para tratar dos dados fornecidos pelos especialistas, verificando as restrições inerentes às probabilidades compostas, calculamos a minimização quadrática entre as  $P(i,j)$  dadas pelos especialistas e as  $P(i,j)$  teóricas, assim constituímos a minimização das Probabilidades de Estado.

O sistema, assim formado, apresenta-se sob a forma quadrática, podendo levar em consideração um número finito de estados  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n$  com as respectivas probabilidades sob as restrições:  $\pi_1 > 0, \pi_2 > 0, \dots, \pi_n > 0$ .

As probabilidades de Estado são obtidas pela minimização da seguinte função:

$$\begin{aligned}
 7) \quad & (0,16 - \pi_1 - \pi_4)^2 + (0,32 - \pi_2 - \pi_6)^2 + \\
 & (0,18 - \pi_1 - \pi_3)^2 + (0,56 - \pi_2 - \pi_5)^2 + \\
 & (0,28 - \pi_1 - \pi_4)^2 + (0,18 - \pi_3 - \pi_7)^2 + \\
 & (0,36 - \pi_1 - \pi_2)^2 + (0,42 - \pi_3 - \pi_5)^2 + \\
 & (0,28 - \pi_1 - \pi_3)^2 + (0,03 - \pi_4 - \pi_7)^2 + \\
 & (0,35 - \pi_1 - \pi_2)^2 + (0,06 - \pi_4 - \pi_6)^2 +
 \end{aligned}$$

A obtenção da minimização da função quadrática é possível pela aplicação das condições de Kuhn-Tucker à seguinte função:

8)

$$M\pi = \alpha$$

onde:

$M$  = matriz obtida

$\pi$  = probabilidade de estado a calcular

$\alpha$  = vetor coluna, coeficiente linear da função, donde se pode determinar o valor da variável desconhecida

9)

$$\pi = (\alpha \cdot M^{-1})$$

Obtemos, assim, um conjunto de pontos soluções.

Entretanto, no cálculo iterativo para determinar o valor de  $\pi$ , valores negativos podem surgir, fugindo desse modo às restrições do problema proposto

$$(\pi \geq 0)$$

Portanto preferimos utilizar o algoritmo de LEMKE, que permite resolver o sistema.

10)

$$W + M\pi = \alpha$$

com  $\pi \geq 0$ ;  $\alpha \geq 0$ ,  $W^* \cdot \pi = 0$ .

Sob esta forma, o algoritmo permite a obtenção sem ciclagem de soluções.

Aplicamos, aqui, um tratamento informático dos dados a partir de programa de minimização quadrática (LEMKE), definido pelo Sr. HARGUE (CEA - SACLAY). [6]

### 3.3. As probabilidades dos cenários

- 11)  $E_1 (e_1, e_2, e_3), \pi_1 = 0,182$   
 $E_2 (\bar{e}_1, e_2, e_3), \pi_2 = 0,193$   
 $E_3 (e_1, \bar{e}_2, e_3), \pi_3 = 0,066$   
 $E_4 (e_1, e_2, \bar{e}_3), \pi_4 = 0$   
 $E_5 (\bar{e}_1, \bar{e}_2, e_3), \pi_5 = 0,361$   
 $E_6 (\bar{e}_1, e_2, \bar{e}_3), \pi_6 = 0,094$   
 $E_7 (e_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3), \pi_7 = 0,072$   
 $E_8 (\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3), \pi_8 = 0,033$

Distinguimos duas formas de cenários:

O *cenário de tendência* - que se propõe estabelecer os grandes traços das imagens futuras. São os cenários  $E_5 (\bar{e}_1, \bar{e}_2, e_3)$  caracterizado por uma forte probabilidade de implantação das técnicas de pequena potência, e  $E_2 (\bar{e}_1, e_2, e_3)$  que representa o cenário de utilização das grandes potências após o domínio e o emprego das técnicas de pequena potência em larga escala.

O cenário contrastado - que admite, de início, restrições mais limitadas do que os cenários tendenciais. Os cenários contrastados são baseados sobre futuros antecipados que tomam como ponto de partida a realidade presente. São, por exemplo,  $E_6$  e  $E_7$  (probabilidades respectivas 0,094 e 0,072) que nos conduzem ao aparecimento de técnicas de altas potências antes das pequenas potências. No entanto as possibilidades de realização são muito reduzidas. As possibilidades de  $E_6$  ( $\bar{e}_1, e_2, \bar{e}_3$ ) são mais significativas.

### 3.4. As probabilidades "a posteriori"

A aplicação do método de Impacto Cruzado tem como consequência direta, o melhoramento das previsões dadas pelos especialistas.

	$e_1$	$e_2$	$e_3$
$e_1$	0,2	0,7	0,4
$e_2$	0,8	0,4	0,5
$e_3$	0,9	0,9	0,7

Probabilidades dadas pelos especialistas.

	$e_1$	$e_2$	$e_3$
$e_1$	0,32	0,39	0,31
$e_2$	0,57	0,47	0,47
$e_3$	0,78	0,8	0,8

Probabilidades a "posteriori" (a).

Constatamos uma modificação das probabilidades tanto individuais como condicionais, ainda que no caso das probabilidades individuais só o evento  $e_1$  foi submetido a uma modificação significativa.

(a) Probabilidades "a posteriori" porque partimos das informações dadas pelos especialistas e as transformamos, para as tornar coerentes segundo os axiomas clássicos de probabilidades condicionais.

4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade, realizada a partir das probabilidades a posteriori, nos permite determinar a influência dos eventos exteriores sobre os eventos avaliados pelos especialistas. Apresenta, portanto, um interesse todo particular para o nosso estudo, permitindo, por uma parte, verificar a estabilidade de probabilidade dos cenários, e, por outra parte, levando em conta, sistematicamente, as possíveis modificações de tendência, apreciar os limites de validade dos cenários.

Consideramos para o cálculo da elasticidade uma variação da probabilidade individual de 10%. Aplicando-se novamente o algoritmo de LEMKE, obtemos novos valores para a probabilidade de estado.

Medimos, assim, a variação  $P_j$  e  $P_i$  após uma variação de  $P_i$  a  $P_j$ , de modo que:

12)

$$e_{ij} = \frac{P_i}{\Delta P_i} \times \frac{\Delta P_j}{P_j}$$

Isto nos permite construir o quadro das elasticidades:

	1	2	3	
1			-0,16	0,16
2	0		-0,12	0,12
3	-0,31	-0,21		0,52
	0,31	0,21	0,28	

Podemos em conclusão precisar as probabilidades dos eventos, escolhidos no quadro de três cenários típicos.

4.1. Cenário com Probabilidades Elevadas

Como podemos observar sobre o quadro das elasticidades, os totais marginais, em valor absoluto, indicam (em linha) a utilização das pequenas potências de conversão sobre o sítio ( $e_3$ ) como dominante, confirmando, assim a forte probabilidade do cenário tendencial,  $E_5$  ( $\bar{e}_1, \bar{e}_2, e_3$ ).

Esta posição é reforçada pelas duas elasticidades negativas  $e_{3/1}$  e  $e_{3/2}$ : significam que se as probabilidades de utilização das pequenas potências aumentam de 100%, as probabilidades das grandes potências, em sistema misto ou exclusivamente solar, diminuem consideravelmente.

#### 4.2. Cenário com probabilidades bastante fracas

O cenário tendencial ao qual os especialistas tinham atribuído uma probabilidade interessante após  $E_5$  ou seja  $E_2(\bar{e}_1, e_2, e_3)$ , corresponde à utilização das grandes potências de conversão em sistema misto, mas após o domínio das técnicas de pequena potência.

O cenário apresenta o interesse de ser o único acesso à utilização das grandes potências com um mínimo de probabilidade.

Notamos que as duas elasticidades  $e_{1/2}$  e  $e_{3/1}$  nulas nos mostram a estabilidade das probabilidades respectivas dos dois modos de produção no caso da modificação das condições de utilização das grandes potências. Por outra parte, ele representa um dos limites do cenário precedente = a elasticidade negativa  $e_{2/3}$  traduz o recuo previsível das técnicas com potência limitada diante da possibilidade de utilizar as potências superiores. Entretanto, os cenários não se excluem, porque eles conservam sua especificação de implantação: sobre o sítio e portanto de preferência no nível artesanal e agrícola, para o primeiro, enquanto que a utilização das grandes potências em sistema misto, permite pensar nas aplicações industriais em grande escala.

#### 4.3. Cenário com Fraquíssima Probabilidade

Os totais marginais (coluna) evidenciam, como o evento mais nitidamente dominado, a utilização das grandes potências de conversão em sistema exclusivamente solar.

No caso, muito pouco provável, de uma utilização das grandes potências, anterior à das pequenas potências, o cenário correspondente ao modo de produção por sistema misto apresenta probabilidades de realização mais significativas do que o sistema solar.

## 5. CONCLUSÃO

Esboçaremos uma conclusão, em dois níveis: - ao nível metodológico, em primeiro lugar, já que os instrumentos utilizados neste estudo nos parecem de grande interesse, para qualquer estudo de previsão e prospectiva que tenha como objetivo fornecer uma ajuda à decisão; - ao nível da aplicação à energia solar, as determinações de probabilidade de cenários são decorrentes das opiniões expressas pelos especialistas e das interdependências entre as questões postas.

Ao término do nosso estudo, conseguimos evidenciar as tendências dominantes e os cenários altamente prováveis, sem tomar posição categoricamente, pelos motivos expostos acima, sobre o interesse econômico e político de tal aplicação em detrimento de outra. Entretanto, esperamos ter mostrado com clareza os dados, constituindo o quadro e as condições do desenvolvimento da energia solar, permitindo assim um possível prolongamento em dois níveis.

Pela organização responsável das diretrizes e das escolhas energéticas do país, tais trabalhos, apresentando um estudo de conjunto das técnicas solares e de suas relações ao meio ambiente, podem ser instrumentos de ajuda à decisão na seleção econômica e política da energia solar como fonte energética. A partir desta hipótese, tratar-se-ia de orientar as pesquisas tecnológicas e estudar as condições particulares de aplicação, no tocante ao modo de financiamento, o mercado concorrente, as compras de "brevets", os contratos com as organizações de pesquisa, dentre outras.

Para o pesquisador interessado pelos problemas solares, abrem-se múltiplas vias: estudar, por exemplo, com pormenores as estratégias consideradas e os instrumentos de aplicação, na medida em que um campo de ação restrito pode ser definido; estabelecer as escolhas de técnicas, ou ainda, quantificar a demanda energética solar, e, estudar suas possíveis repercussões no conjunto energético nacional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - JANTSCH, Erich - *La Prévision Technologique*. Paris, O.C.D.E., 1967. JANTSCH, Erich - *Prospective et Politique*. Paris, O.C.D.E., 1973.
- [2] - SANTOS, João Luiz Fonseca dos - *Prospective du Développement de l'Énergie Solaire au Brésil*; 3<sup>ème</sup> Cycle en Sciences Économiques. Paris, Université de PARIS I PANTHEON - SORBONNE, 1976.
- [3] - DURAND, R. Delphi et prospective de l'hydrogène, *Metra*, XIV, n<sup>o</sup> 4, 1975.
- [4] - GAUSSENS, Jacques - *Les décisions en recherche et développement* Paris, Dunod, 1971.
- [5] - DUPERRIN, Jean-Claude & GODET, Michel - *Prospective des systèmes et construction d'une nouvelle méthode d'impacts croisés - "SMIC 74"*. v. XIII, n<sup>o</sup> 4. Paris, in *Revue METRA*. 1974. pp. 505-532.
- [6] - LA HARGUE, J.P. - *Minimisation quadratique détaillée* CISI/SACLAY n<sup>o</sup> 534. Paris, Compagnie Internationale de Services en Informatique (CISI), 1975.