

## **Detecção de Locais de Elevado Potencial para a Instalação de Parques Eólicos**

Cláudio Monteiro  
cdm@bart.inescn.pt

Vladimiro Miranda  
vmiranda@umac.mo

João Tomé Saraiva  
jpts@lorde.inescn.pt

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
INESC - Pr. da República 93, 4050 Porto, Portugal  
Fax: +351.2.2084172; <http://www.inescn.pt/~lproenca/index.html>

### **Resumo**

Neste artigo descreve-se de forma sintética a metodologia utilizado no projecto europeu SOLARGIS, sendo apresentados alguns resultados da sua aplicação à ilha de Santiago situado no arquipélago de Cabo Verde. A metodologia pretende demonstrar a eficiência dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como ferramenta de apoio à elaboração de planos de integração de energias renováveis. Na parte inicial do artigo serão referidos aspectos relacionados com a construção da base de dados e aspectos relacionados com o mapeamento dos recursos energéticos da região. Neste artigo abordaremos especialmente a metodologia de detecção de locais de elevado potencial para a instalação de parques eólicos. Por fim será feita uma referência à utilidade e potencialidade das ferramentas implementadas no projecto SOLARGIS.

**Palavras Chave** - SIG, Energias Renováveis, Sistemas Isolados, Parques Eólicos

### **1. INTRODUÇÃO**

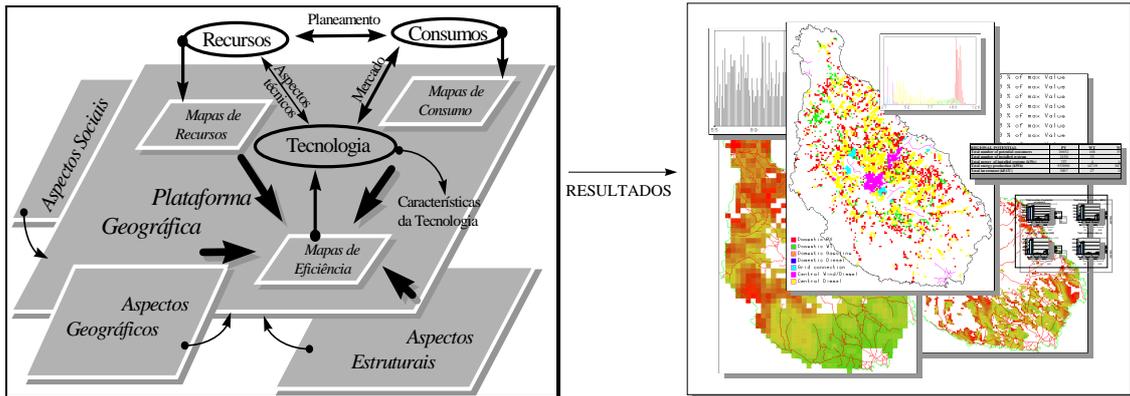
O SOLARGIS é um projecto financiado pela comunidade europeia no âmbito do programa Joule que envolve laboratórios de investigação de sete países europeus. Cada um destes países aplica as metodologias desenvolvidas numa região específica. Estas regiões poderão ser regiões da Europa ou regiões de países em vias de desenvolvimento. Coube ao INESC a tarefa de desenvolver, implementar e aplicar as metodologias na ilha de Santiago em Cabo Verde.

O consórcio SOLARGIS é composto por:

- ARMINES, França
- CIEMAT, Espanha
- CONPHOEBUS, Itália
- CRES, Grécia
- INESC, Portugal
- NMRC, Irlanda
- RAL, Reino Unido

É objectivo deste projecto demonstrar a eficiência de novas tecnologias de análise baseadas em SIG - Sistemas de Informação Geográfica - na elaboração e acompanhamento de planos de integração de Energias Renováveis (ER). Parte da metodologia é dedicada à localização de regiões de elevado potencial para a instalação de parque eólicos.

O problema da integração de energias renováveis pode ser encarado como um problema de afectação entre tecnologias, recursos e consumos. Obviamente todas as componentes do problema estão relacionadas com características geográficas. A tarefa do SOLARGIS consiste em trazer para um plano geográfico todo o problema. Assim, a metodologia de avaliação técnica e económica, planeamento e estudos de mercado poderão ser realizadas dentro da globalidade dos aspectos envolventes do problema.



**Figura 1** Princípio metodológico do SOLARGIS

O SOLARGIS constitui uma ferramenta de apoio integral permitindo uma análise geográfica da viabilidade dos diversos sistemas de ER. As ferramentas desenvolvidas dividem-se de acordo com dois tipos de análise diferente:

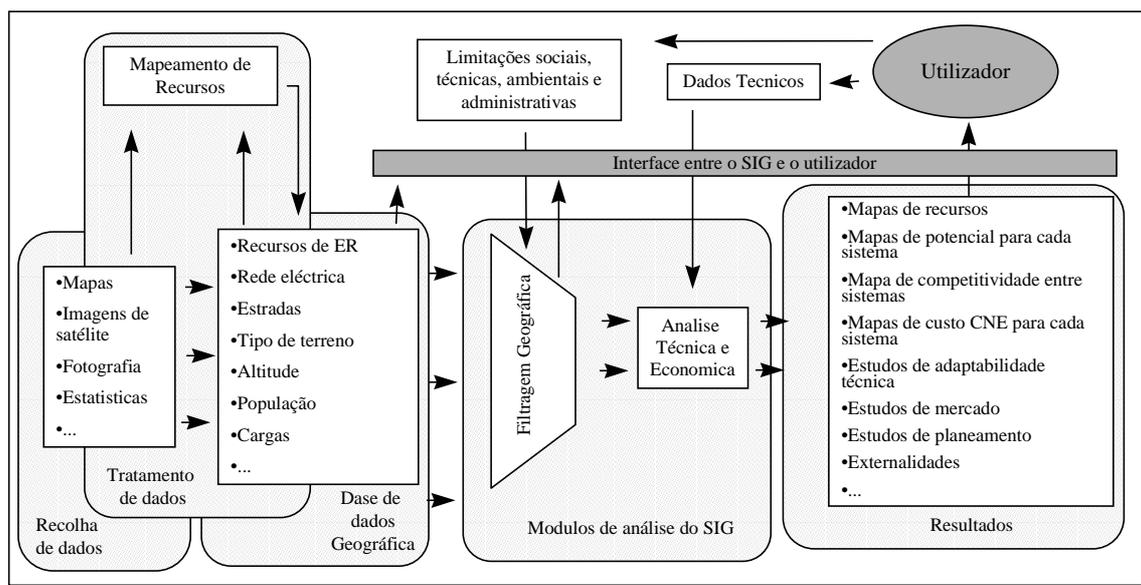
- Por um lado, é possível estudar geograficamente as melhores localizações para a instalação de parques eólicos ou centrais solares ligados à rede eléctrica. Nestes estudos são tidos em conta os custos de investimento, de instalação e de manutenção, incluindo a construção da linha até ao ponto de interligação.
- O outro tipo de estudos refere-se a sistemas isolados da rede eléctrica. Estes sistemas poderão ser sistemas individuais alimentando casas isoladas, ou sistemas de média dimensão alimentando pequenas aldeias ou vilas. Com estas metodologias são criados mapas de competitividade entre os diversos sistemas e avaliados os custos de produção para um sistema específico em cada local caracterizado pela carga a alimentar e pelos recursos energéticos.

O Projecto SOLARGIS é descrito em detalhe em [1,2]. Exemplos de aplicação e descrição detalhada podem ser encontrados nos seguintes endereços:

- <http://www.inescn.pt/~lproenca/solargis/solargis.html>
- <http://www.cennerg.cma.fr/~st/solargis.html>

## 2. A METODOLOGIA

A elevada quantidade de dados que descrevem de forma geográfica as características da região são introduzidos, segundo formatos uniformizados, dentro de uma base de dados geográfica.



**Figura 2** Processo metodológico do SOLARGIS

O mapeamento dos recursos energéticos da região, solares e eólicos, é realizado com a melhor resolução possível e baseado nas séries de dados meteorológicos recolhidos durante os últimos anos. O mapeamento destes recursos poderá ser feito de duas formas: através de modelos programados directamente no SIG; ou através de programas exteriores apoiados por técnicas de importação e exportação entre o SIG e o exterior.

A informação, devidamente georeferenciada e uniformizada, é cruzada segundo regras ditadas por limites técnicos, sociais e administrativos. Este cruzamento de informação pode ser encarado como uma filtragem geográfica em que são delimitadas as áreas em que é possível aplicar cada uma das tecnologias.

O estudo dos custos para as diferentes soluções de electrificação é feito baseado no Custo Anualizado de Electricidade (CAE) expresso em (\$/kWh). O CAE representa o custo da electricidade produzida pelo sistema e cedida à carga tendo em conta os diversos custos ao longo do tempo de vida do equipamento.

Por fim, é feita a comparação entre os diversos sistemas localizando os melhores locais, delimitando áreas de elevado potencial para cada sistema e efectuando estudos de viabilidade para as diversas tecnologias.

### **2.1 Recolha e Tratamento dos Dados**

Tal como em qualquer outro trabalho baseado em SIG, a recolha de dados é a fase mais trabalhosa do projecto. Os dados poderão ser originários de várias fontes: bases de dados de instituições estatais, bases de dados de empresas de electricidade, bases de dados de institutos meteorológicos, mapas, fotografia aérea, imagens de satélite, etc.

Os sistemas de informação geográfica utilizam dois formatos de dados: o formato vectorial e o formato *raster*. A obtenção de dados sob o formato *vectorial* é feita através da digitalização de mapas, sendo posteriormente associados atributos a cada um dos elementos gráficos. As camadas temáticas de formato vectorial são denominadas coberturas e são utilizadas para armazenar elementos geográficos bem definidos tais como redes eléctricas, rede de estradas, regiões administrativas, estações meteorológicas, etc. As camadas temáticas com formato do tipo *raster* denominam-se grelhas e são utilizadas para efectuar todo o processo de cálculo operando elemento a elemento. As grelhas são utilizadas também para armazenar velocidades de vento, radiação global, densidade de população, distância a estradas, distância à rede eléctrica, etc.

Durante o tratamento dos dados é necessário proceder à sua normalização, utilizando uma projecção e referência comum a todas as coberturas e grelhas. Outro aspecto da normalização consiste na utilização de uma resolução que seja compatível com a dimensão da região em estudo, com o pormenor dos resultados pretendidos e com a resolução dos dados disponíveis.

### **2.2 Mapeamento dos Recursos Energéticos**

O mapeamento de recursos energéticos é baseado em metodologias confirmadas e bem documentadas. Para os recursos eólicos existem alguns modelos de prognóstico de ventos baseados em: dados pontuais sobre direcção e velocidade de vento em estações meteorológica; dados sobre a orografia do terreno; dados sobre a rugosidade do terreno e dados sobre a existência de obstáculos. Infelizmente, estes modelos estão implementados em programas que não permitem a sua integração no SIG. Tendo em conta que os dados estão disponíveis no SIG e que os resultados devem ser carregados na base de dados do SIG foi necessário implementar técnicas de importação e exportação. Para o mapeamento de recursos solares não existem modelos de prognóstico sendo utilizada normalmente uma técnica de interpolação dos valores da radiação global das estações meteorológicas. Durante o projecto SOLARGIS foi criada e implementada uma metodologia de interpolação em que são considerados os efeitos de orografia do terreno, o albedo do terreno e a inclinação do painel fotovoltaico.

O mapeamento do consumo é baseado na densidade de população. Por seu lado, esta é estimada graças ao conhecimento da população por zonas administrativas e à existência de uma cobertura de casas permitindo estimar a localização exacta da população.

### **2.3 Filtragem Geográfica**

A primeira fase da metodologia de análise do SOLARGIS consiste no cruzamento de informação geográfica a que denominamos Filtragem Geográfica. A filtragem geográfica é baseada num conjunto de regras em que os limites são fixados pelo utilizador. Por exemplo, para a localização de um parque eólico: são excluídos locais com altitude superior a 1000m; são excluídos locais dentro de zonas proibidas e

protegidas tais como reservas, aeroportos, lagos, corpos de água, zonas de expansão urbana, etc; são excluídos locais com inclinação de terreno superior a 10%; são excluídas zonas de floresta; são excluídos locais a uma distância das casas inferior a 150m; são excluídas zonas com valores médios anuais de vento inferiores a 5m/s. Desta forma, é possível filtrar todas as zonas onde é possível instalar o sistema, sendo os passos seguintes do estudo limitados a estas áreas. A filtragem geográfica é um procedimento essencialmente utilizado no estudo de parques eólicos.

#### 2.4 Análise Técnico Económica para a Localização de Parques Eólicos

A análise técnica e económica, tal como a filtragem, varia de sistema para sistema. No entanto, a análise técnica consiste na delimitação do problema segundo os aspectos técnicos referentes a cada sistema. Por exemplo, um parque eólico será interligado a um determinado ponto de interligação através de uma linha de interligação. Obviamente, existirão condições de queda de tensão que limitarão a área de estudo segundo a proximidade ao ponto de interligação, função da potência instalada no parque e das características da linha.

A análise económica é baseada no cálculo do Custo Anualizado de Electricidade (CAE) expresso em \$/kWh. O CAE é a razão entre os custos e a energia produzida e cedida à carga. Os custos são custos anuais de investimento, de instalação, de operação e manutenção de todos os equipamentos e infra-estruturas necessárias. Em relação aos custos, que não são anuais, é calculada uma renda anual ao longo do tempo de vida do equipamento.

Para o caso específico de um parque eólico o CAE é dado pela expressão:

$$CAE = \frac{C_{int} + C_{ext} + C_{lig} + C_{est} + C_{ter} + C_{inst}}{EAU}$$

$CAE$	→ Custo Anualizado de Produção (\$/kWh)
$C_{int}$	→ Custos Internos (\$/ano)
$C_{ext}$	→ Custos externos (\$/ano)
$C_{lig}$	→ Custo da linha de interligação (\$/ano)
$C_{est}$	→ Custo da construção de estradas (\$/ano)
$C_{ter}$	→ Custo do terreno (\$/ano)
$C_{inst}$	→ Custo de projecto e instalação (\$/ano)
$EAU$	→ Energia Anual Utilizada (kWh/ano)

O  $C_{int}$  está relacionado com o custo de todo o equipamento interno do parque. Este valor não depende de características geográficas mas depende dos custos unitários do equipamento, do seu tempo de vida, das condições de financiamento, etc.

O  $C_{ext}$  é o custo do equipamento que será necessário adicionar na rede receptora para poder interligar o parque. O valor deste custo também não depende de características geográficas do local mas depende das características técnicas do parque e da rede receptora.

O custo da linha de interligação  $C_{lig}$  é calculado através de um modelo de optimização, disponível no SIG. Este modelo minimiza o somatório dos custos de travessia de cada elemento de grelha, encontrando assim o caminho associado ao custo mínimo. Este módulo do SIG utiliza como entrada uma grelha de custos  $GC_{lig}$ , correspondendo ao custo de travessia de cada elemento da grelha. Obviamente, este custo tem uma grande dependência das características geográficas, que deverão ser consideradas no cálculo:

- A inclinação do terreno condiciona o custo de instalação segundo o tarifário da empresa instaladora. Este é um dos factores predominantes no cálculo de  $GC_{lig}$  pois o tarifário apresenta um crescimento exponencial com a inclinação do terreno.
- O tipo de terreno também poderá influenciar bastante a grelha de custo, pois, em terrenos rochosos os tarifários poderão chegar a ser 10 vezes superiores. Obviamente, estes factores multiplicativos são muito inferiores para o caso de linhas aéreas face aos cabos subterrâneos.
- Outro factor multiplicativo da grelha de custos corresponde à necessidade de ultrapassar obstáculos (corpos de água, zonas urbanas, edifícios, etc.). A obstáculos difíceis de transpor correspondem factores multiplicativos mais elevados.
- São considerados também factores multiplicativos que assumem valores tanto maiores quanto maior a distância à estrada mais próxima. Assim, é possível avaliar o esforço adicional devido à dificuldade de acesso para a instalação da linha de interligação.

De forma análoga ao custo da linha de interligação, o custo da construção de uma nova estrada,  $C_{est}$ , é

avaliado através de um modelo de optimização. Este modelo tem como objectivo encontrar o caminho de custo mínimo para a construção de uma nova estrada. Tal como no  $C_{lig}$  existe uma grelha de custo dependente das características geográficas da região.

O custo dos terrenos  $C_{ter}$  depende de aspectos relacionados com o ordenamento do território ou então, poderá ser valorizado segundo o tipo de utilização do terreno.

Os custos de Projecto e instalação,  $C_{ins}$  são os custos de projecto, consultoria, montagem das torres e restante equipamento, preparação do terreno, etc. Uma parte substancial deste custo depende do tipo de terreno e da sua inclinação, sendo todos eles função do tipo de aerogerador a instalar e do equipamento auxiliar existente na região.

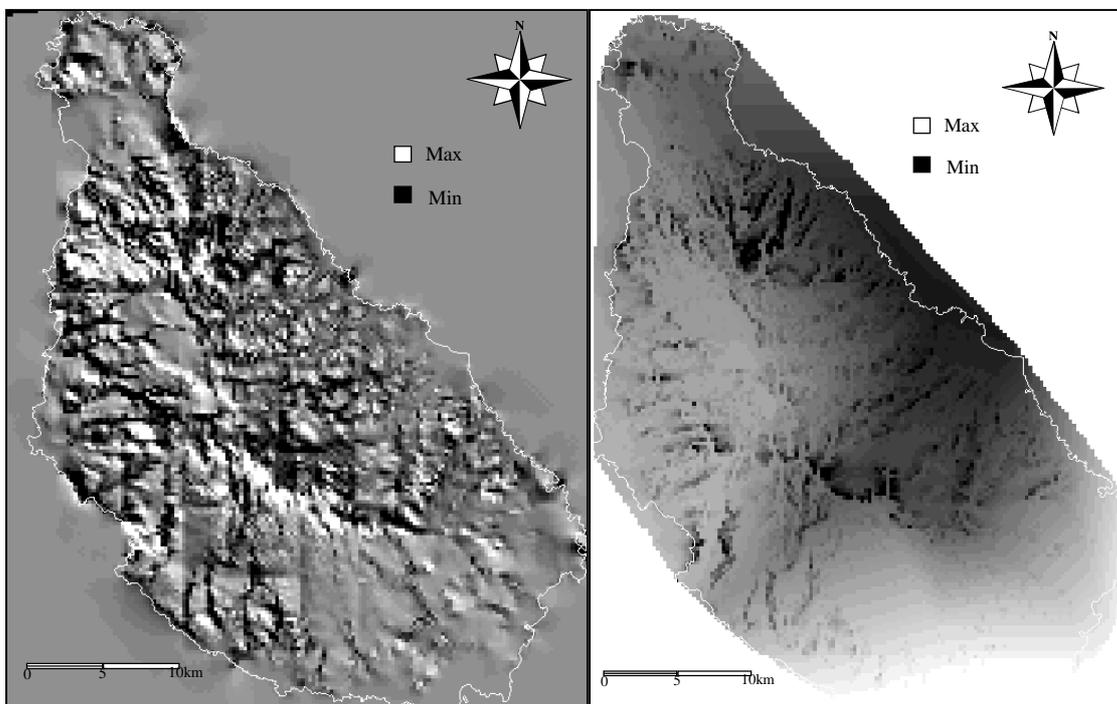
A  $EAU$  é a energia anual fornecida ao ponto de interligação. Esta energia é função de vários factores que são focados com detalhe em [1]. De entre eles, a curva de potência do aerogerador assume uma relevância particular. A partir dela, é possível calcular a potência média anual gerada pelo aerogerador em função dos recursos eólicos do local. O modelo também inclui aspectos relacionados com o *layout* do parque considerando a sua adaptação ao local.

### 3. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM CABO VERDE

A metodologia descrita no ponto anterior foi aplicada à totalidade da ilha de Santiago, em Cabo Verde, com uma resolução de 250 m. Esta ilha possui uma área de 991 km<sup>2</sup>, orienta-se na direcção SE-NW tendo um comprimento máximo de 55 km e uma largura máxima de 37 km. A ilha possui uma orografia complexa em que os maciços montanhosos mais elevados atingem os 1000m.

A ilha de Santiago tem cerca de 150 mil habitantes, 60 mil dos quais localizados na cidade da Praia. A grelha de densidade de população foi construída graças a dados de população das regiões administrativas e graças a informação relativa à cobertura de casas. A população na zona central da ilha encontra-se bastante dispersa o que dificulta o processo de electrificação.

A rede eléctrica da ilha é constituída por uma rede eléctrica principal na cidade de Praia e por pequenas redes isoladas e dispersas pela ilha. A potência instalada da rede principal é de aproximadamente 10 MW e a potência das restantes redes é em geral inferior a 500 kW.



**Figura 3** Grelhas de vento e de radiação global

A grelha de velocidades de vento foi obtida com o modelo de ventos WA<sup>S</sup>P [3] desenvolvido pela RISØ. Para o cálculo foram utilizados valores de direcção e velocidade de vento medidos na cidade da Praia ao longo dos últimos 30 anos. Para além das medidas foi tida em conta a orografia do terreno e a rugosidade

do terreno. A grelha de velocidade média anual de vento, a 10 m de altura do solo, pode ser observada na figura 3, as zonas mais claras correspondem a valores de velocidade de vento mais elevadas.

A grelha de radiação global foi calculada com um modelo de interpolação desenvolvido no projecto SOLARGIS. Nesta grelha podemos ver o efeito da orografia bem como a heterogeneidade climática da ilha. As figuras mostram a grelha e o respectivo histograma da Radiação Global média anual.

### 3.1 Aplicação da metodologia para sistemas ligados à rede

Para a localização de parques eólicos foram considerados vários cenários [2], dois dos quais serão focados neste artigo:

1. O primeiro cenário considera que o ponto de interligação do parque está localizado na cidade da Praia. Pretende-se localizar um parque com nove aerogeradores com potências unitárias de 300 kW, sendo a interligação feita através de um cabo de cobre de 95 mm<sup>2</sup>. Foi considerado um *layout* com alinhamento perpendicular à direcção predominante do vento.
2. O segundo cenário considera que já existem três aerogeradores de 300 kW instalados no Monte de S. Filipe pretendendo-se ligar mais 4 aerogeradores de 500 kW ao cabo já instalado. Foi considerado um *layout* com alinhamento perpendicular à direcção predominante do vento estando os aerogeradores distanciados de 250 m.

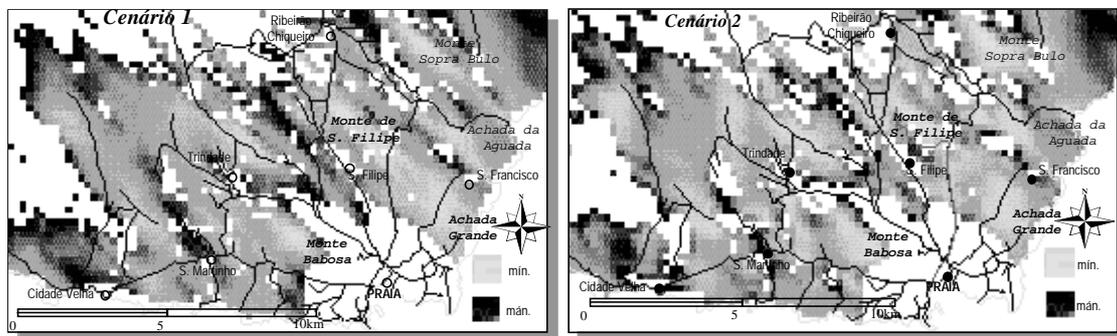


Figura 4 Mapas de CAE para o Cenário 1 e para o Cenário 2

Na Figura 4 podemos observar os melhores locais para a instalação do parque (zonas mais claras), as zonas a branco são zonas excluídas pela filtragem geográfica. Obviamente, os melhores locais correspondem a regiões com velocidades médias de vento mais elevadas. É possível observar, em regiões como a Achada Grande, que a proximidade de estradas permite obter melhores valores de CAE. Por outro lado comparando o Cenário 1 com o Cenário 2, seguindo a estrada que leva ao monte de S. Filipe, verifica-se que o custo do cabo não afecta significativamente o valor do CAE. Mesmo assim, é possível notar alguma diferença entre os dois cenários, podendo atingir os 10%. A diferença mais significativa entre os dois cenários está na forma das regiões de elevado potencial, que se verifica serem mais alongadas para o Cenário 1. Este facto é devido ao *layout* do parque. No cenário 2 foram considerados apenas 4 aerogeradores face aos 9 do Cenário 1, pelo que o cenário permite uma maior adaptação do *layout* à orografia do terreno. Comparando os histogramas dos dois cenários podemos observar os valores mais baixos do CAE do Cenário 2. Esta diferença de valores é devida a três factores: uma melhor adaptabilidade do *layout*; foi considerado que o cabo já estava instalado; utilização de aerogeradores de potências superiores.

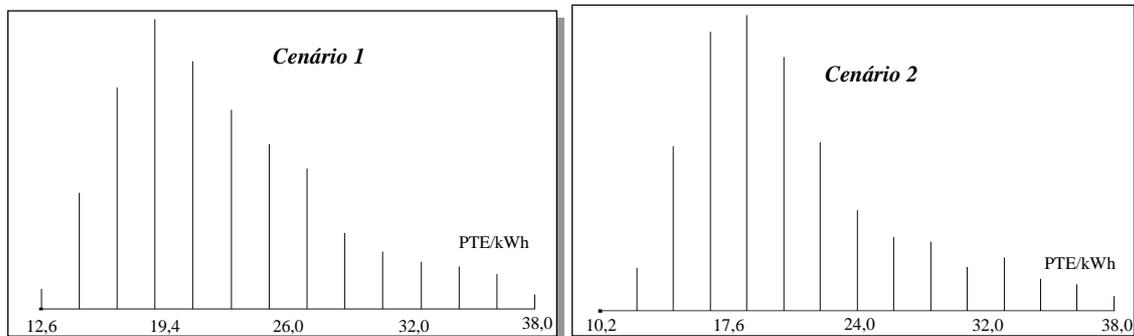


Figura 5 Histogramas das grelhas de CAE (em PTE/kWh) para o Cenário 1 e para o Cenário 2

Os resultados obtidos mostram uma grande eficiência da metodologia. Em 1994 foram instalados os primeiros 3 aerogeradores no Monte de S. Filipe o que permitiu confirmar alguns dos resultados. Curiosamente, durante a segunda fase do projecto (instalação de mais 2 MW) foi considerada a possibilidade de instalar o parque em outros locais também indicados pela metodologia, tais como, o Monte Babosa e a Achada Grande.

### 3.2 Aplicação da metodologia para sistemas isolados

Para sistemas isolados foram considerados dois cenários em que são comparados diversos sistemas. Em [2] pode ser encontrada uma descrição detalhada dos parâmetros utilizados para estes cenários.

1. O primeiro cenário diz respeito a preços de equipamentos actuais (1996). Consideramos que os sistemas individuais alimentam cargas de 400 Wh/dia, sendo o dimensionamento feito em função da carga. Para sistemas Diesel e W/D consideramos que o gerador Diesel terá uma potência igual ao dobro da carga média do grupo de consumidores a alimentar. Os geradores eólicos dos sistemas W/D terão uma potência 1.5 vezes o valor da carga média. A carga média do grupo de consumidores é calculada função da densidade de população sendo considerado um consumo 30 kWh/capita/ano.
2. Na segunda situação pretende-se planear o sistema de electrificação que deverá estar instalado no ano de 2010. Para sistemas individuais consideramos que: o preço dos sistemas individuais fotovoltaicos diminuirá para metade; os preços de sistemas eólicos individuais diminuirão 25%; o consumo por habitação aumenta para 1200 Wh/dia. Para os restantes sistemas consideramos que o consumo aumenta para 90 kWh/capita/ano.

Observando os mapas de competitividade apresentados na figura 6 podemos ver que apesar da elevada quantidade de Centrais Diesel existem alguns locais em que é viável a instalação de sistemas W/D. Os locais onde é viável a instalação de sistemas W/D são locais com muito bons recursos eólicos e em que a densidade de carga é elevada. Para 1996 foi contabilizada a alimentação de 350 kW de carga com sistemas W/D, enquanto que para 2010 foram contabilizados mais 500 kW passando os 350 anteriores a ficar absorvidos pelas redes locais.

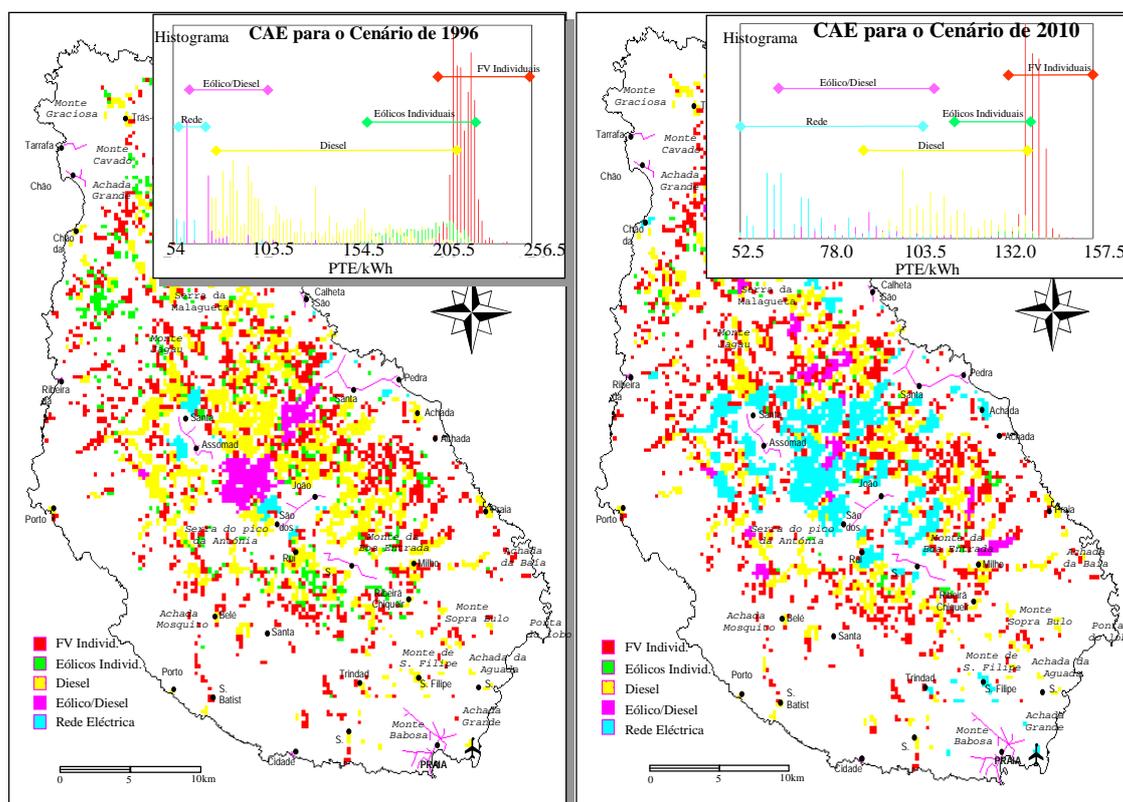


Figura 6 Mapas de competitividade entre os diversos sistemas isolados para o cenário de 1996 e 2010.

Ao longo dos últimos anos foram feitos grandes esforços para electrificar algumas zonas da ilha. No entanto a electrificação tem-se tornado inviável devido aos baixos consumos das regiões rurais. Este facto foi confirmado no nosso estudo encontrando-se, em 1996, poucos locais onde era viável a ligação à rede.

No entanto, o aumento da carga para 2010 permitirá alargar significativamente as zonas alimentadas pela rede levando a que estas se interliguem e absorvam sistemas W/D e Diesel do cenário de 1996.

Para as zonas rurais com menor densidade populacional e afastadas das redes, as melhores soluções de electrificação baseiam-se em sistemas individuais. Podemos observar o grande mercado existente para sistemas fotovoltaicos (em 1996, cerca de 3820 sistemas alimentando uma carga total de 1780 kW). Os sistemas eólicos só são viáveis em locais com muito boas condições de vento existindo em 1996 um mercado para 969 sistemas alimentando uma carga total de 55 kW. Para o segundo cenário verifica-se uma diminuição da viabilidade de sistemas eólicos (250 sistemas alimentando 33 kW), face a um crescimento do mercado dos sistemas fotovoltaicos (3820 sistemas alimentando 494 kW).

Os valores mais baixos de CAE correspondem aos locais ligados à rede com valores da ordem dos 55 PTE/kWh. Os sistemas W/D e Diesel poderão ter valores entre 55 e 200 PTE/kWh dependendo da densidade de carga a alimentar. Por fim, podemos observar que os sistemas individuais tem o CAE mais elevado com valores de 210 PTE/kWh para 1996 e 140 para 2010. Apesar de os sistemas eólicos só competirem com os sistemas fotovoltaicos para locais com muito boas condições de vento verifica-se que os sistemas eólicos tem valores de CAE mais baixos.

#### **4. CONCLUSÃO**

A nível governamental e político é necessário garantir que se dêem prioridade às energias renováveis definindo uma política que assegure uma interacção coerente entre os diversos interesses económicos, ambientais, interesses privados e problemáticas de incompatibilidade e competitividade. Todos estes aspectos podem ser modelizados e tratados através de uma metodologia como o SOLARGIS, proporcionando uma imagem fiel das características geográficas dos vários aspectos do problema da integração de energias renováveis. Apesar das metodologias do SOLARGIS ainda não terem atingido a maturidade, a realização de estudos e na aplicação a várias regiões com características diferentes permitiu-nos conhecer com bastante pormenor as enormes potencialidades destas ferramentas de ajuda à decisão a entidades políticas, agentes de planeamento, investidores, fabricantes e empresas de electricidade

Face aos resultados obtidos e às potencialidades das metodologias implementadas no SOLARGIS acreditamos que com este projecto foi encontrada a ferramenta ideal para apoiar e demonstrar a viabilidade dos sistemas de energias renováveis possibilitando, assim, aos actores intervenientes no sector energético a tomada de decisões com uma visão clara dos benefícios, riscos e pontos críticos dos seus projectos.

#### **Agradecimentos**

O trabalho descrito nesta comunicação foi parcialmente financiado pelo contracto PRAXIS 2/2.1/TIT/1643/95

#### **Referências Bibliográficas**

---

1 "The SOLARGIS Handbook - guidelines for the elaboration of regional integration plans for decentralized electricity production with renewable energies" (book), ed. SOLARGIS Consortium, JOULE2 Program, Contract JOU2-CT94-04309, Jul 96.

2 "SOLARGIS, Integration of Renewable Energies for Decentralized Electricity Production in Regions of EEC and Developing Countries", ed. SOLARGIS Consortium, JOULE2 Program, Contract JOU2-CT94-04309, Progress Reports, Nov94, Jul95, Nov95, Jul96

3 N. Mortenson et al., "Wind Atlas analysis and application program (WASP) - Vol. 1: getting started; Vol. 2: user's guide, Risø National Laboratory, Denmark, Jan 1993