

## COMPARAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DAS TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS POR INDICADORES TECNOLÓGICOS, ECONÓMICOS, AMBIENTAIS E SOCIAIS

**Rui Pedro Mendes<sup>1\*</sup>, Pedro Dinis Gaspar<sup>1†</sup>, Luís Carrilho Gonçalves<sup>1‡</sup>**

1- Departamento de Engenharia Electromecânica – Faculdade de Engenharia, Universidade da Beira Interior, Edifício 1 das Engenharias, Calçada do Lameiro, 6201-001 Covilhã, Portugal, e-mail: \*ruipgmendes@gmail.com, †dinis@ubi.pt, ‡carrilho@ubi.pt

**Palavras chave:** Energias Renováveis, Conversão de Energia, Sustentabilidade, Indicadores

### Resumo

A sustentabilidade de vários processos de conversão de energia em energia eléctrica, especialmente, os alternativos aos combustíveis fósseis, são analisados e comparados neste trabalho. As tecnologias analisadas são baseadas em fontes de energia renovável: eólica, solar, oceanos (ondas e marés), hídrica, geotérmica, nuclear e hidrogénio. Os dados relativos ao processo tecnológico de conversão de energia são fundamentados e recolhidos na bibliografia especializada que descreve o ciclo de vida associado a cada tecnologia. A análise da sustentabilidade é efectuada de um ponto de vista tecnológico e inclui a avaliação dos vários subsistemas que compõem os processos de conversão, nomeadamente, os subsistemas de desempenho tecnológico, económico, ambiental e social. Para tal, os indicadores que melhor descrevem as tecnologias e que se encontram relacionados com esses subsistemas são seleccionados para quantificar os processos de conversão. Entre os indicadores escolhidos encontram-se a eficiência da tecnologia na conversão de energia, o tempo de vida, o custo de geração de electricidade, o custo de capital, as emissões de CO<sub>2</sub>, a área ocupada, os postos de emprego criados e a aceitação social das tecnologias. Após a definição dos indicadores, funções de pertinência são aplicadas para determinar o índice de sustentabilidade que quantifica quão sustentável é cada um dos processos tecnológicos de conversão de energia. Os índices de sustentabilidade são comparados com o intuito de aferir as tecnologias de conversão de energia em energia eléctrica mais sustentáveis actualmente e no futuro mais próximo. Considerando dois casos de estudo, onde a ponderação das funções de pertinência é alterada, os indicadores globais de sustentabilidade sugerem que o mix de sistemas de conversão de energia em energia eléctrica, deve assentar maioritariamente nas fontes hídrica, eólica e nuclear.

## 1. Introdução

Os sistemas de energias renováveis tornaram-se amplamente utilizados devido à necessidade mundial de reduzir o consumo de combustíveis fósseis, com o intuito de reduzir a pegada ambiental. Todavia, a densidade energética providenciada por estes sistemas é muito inferior, como por exemplo, à energia nuclear, que hoje em dia, num sentido mais lato, pode ser considerada como uma fonte de energia "quase" renovável, pois as centrais nucleares de nova geração podem reutilizar urânio e seus derivados. Porém, urge repensar novamente o mix de fontes de energia utilizadas no suprimento de energia eléctrica, pois o recente acidente no reactor n.º 3 da central nuclear Fukushima Daiichi no Japão, em consequência do terramoto e tsunamis a 11 de março de 2011, tornou a avivar os receios e toda a problemática associada às radiações em caso de acidente nuclear. Este acidente, que nada teve a ver com erro humano ou dos sistemas, mas sim devido a efeitos sísmicos que não podem ser controlados nem previstos em tempo útil, irá com certeza fazer emergir receios nas populações e governantes onde está prevista a construção de novas centrais. Como exemplo, após 20 dias do acidente na central de Fukushima, os níveis de radiação continuam a subir no oceano. Os valores de radiação na água do mar a cerca de 330 metros da costa sul da central, atingem 4385 vezes o limite legal. Assim, os impactos negativos da energia nuclear estão novamente na mente de todos. A discussão em torno da sua segurança pode travar os planos de construção de novas centrais nucleares. Como a construção em larga escala de centrais de conversão de energia a partir de combustíveis fósseis também não pode ser realizada devido aos impactos ambientais negativos, a sustentabilidade dos sistemas e processos de conversão em energia eléctrica a partir de energias renováveis deve ser avaliado de forma sistemática com o objectivo de analisar a sua evolução tecnológica, impacto ambiental e económico e aprovação social, no sentido de definir uma estratégia mais adequada do mix de fontes de energia utilizadas na geração de energia eléctrica. Este artigo tenciona contribuir nesse sentido, apresentando uma comparação da sustentabilidade das tecnologias de conversão de energia a partir de fontes renováveis, pela quantificação de indicadores de desempenho tecnológico, económico, ambiental e social.

## 2. Fontes de energia renováveis adequadas à conversão em energia eléctrica

Os sistemas de conversão em energia eléctrica a partir de fontes de energia renováveis com maior crescimento são os sistemas eólicos e solares fotovoltaico (PV). Nas seguintes sub-seções são apresentados os valores de potência instalada, distribuição mundial da produção e perspectivas de crescimento dos sectores no futuro, para cada uma das fontes de energia abordadas neste artigo.

### 2.1. Energia eólica

As turbinas eólicas são utilizadas na conversão de energia cinética do vento em energia mecânica e depois em electricidade. Esta forma de energia não produz quaisquer emissões ou contaminações durante a operação do sistema. No final de 2009, a capacidade eólica instalada mundialmente era de 159,2 GW [1]. A produção de

energia alcançou os 340 TWh (2% da electricidade consumida mundialmente). Este sector das energias renováveis apresenta um crescimento muito rápido, tendo duplicado nos últimos três anos. Países como a Dinamarca, Portugal e Espanha alcançaram já 20% e 14% (para cada um dos dois últimos países) da produção de electricidade à base desta fonte de energia.

### 2.2. Energia solar fotovoltaica

A tecnologia solar fotovoltaica (PV) consiste num método de conversão de radiação solar em electricidade através do efeito fotovoltaico. Trata-se de um processo de captação de energia ambientalmente amigável pela sua capacidade de funcionamento sem ruído ou emissão de gases com efeito de estufa.

Em 2010, a potência instalada de energia solar PV ligada à rede era aproximadamente de 21 GW, atingindo os acréscimos de sistemas de energia solar o recorde anual de 7 GW. A Alemanha lidera o mercado, com a adição de 3,8 GW, mais de metade do mercado global. Outros grandes mercados encontram-se na Itália e Japão, enquanto a Espanha, líder mundial em 2008, reduziu o crescimento de novas instalações [2]. Em Portugal, a utilização de sistemas solares PV ainda está muito longe de atingir o potencial disponível deste recurso no país. Estima-se que em 2003, a capacidade instalada de sistemas solares PV era cerca de 2 MW, dos quais apenas 20% estavam ligados à rede. A meta de instalações de sistemas PV em Portugal para o horizonte 2010 era aproximadamente de 150 MW [3].

### 2.3. Energia nuclear

A energia nuclear pode ser definida como a energia convertida pela libertação da energia de ligação dos componentes (núcleos), por exemplo, prótons e neutrões, do núcleo de um átomo. A fonte de energia nuclear baseia-se na conhecida equação de Einstein ( $E = mc^2$ ). Assim, uma pequena quantidade de massa pode ser transformada numa grande quantidade de energia.

A energia nuclear tem já um vasto uso há décadas e pertence a uma gama de opções disponíveis de energias alternativas, porém a sua implementação encontra-se sempre envolta por questões complexas e socialmente delicadas. Neste sentido, considerar-se apenas que a energia nuclear surge como uma de fonte de energia alternativa, viável e aceitável pela elevada quantidade de energia que pode gerar é sempre muito discutível.

A energia nuclear supre 13% ( $\approx 624$  GW) da necessidade mundial de electricidade [3]. A geração de energia eléctrica anual a partir de energia nuclear atingiu 2558 TWh em 2009 [3-4]. Os Estados Unidos da América são o país com maior produção de electricidade a partir de energia nuclear, correspondendo a 19% do total [5]. A França tem a maior percentagem de energia eléctrica produzida a partir de energia nuclear (80% em 2006) [6].

### 2.4. Energia dos oceanos

A análise referente a esta fonte renovável incide na conversão da energia cinética e potencial do oceano. Ambas tecnologias, ondas e marés, serão avaliadas conjuntamente, como uma só. Trata-se de uma fonte renovável com elevado potencial energético, atingindo cerca de 320 GW ao longo da costa Europeia, o que corresponde a 16% do recurso mundial [7-8]. No entanto,

ambas tecnologias utilizadas na conversão desta forma de energia encontram-se ainda em fase de protótipo apesar dos inúmeros dispositivos e técnicas de conversão patenteadas. Por se encontrarem em fase emergente, ainda não existem tecnologias com aplicação comercial e a informação acerca da sua sustentabilidade é ainda baseada em previsões.

### 2.5. Energia Geotérmica

Trata-se de uma fonte de calor proveniente do sub-solo, vários metros abaixo da superfície terrestre. Por cada 100 metros de profundidade, a temperatura aumenta cerca de 3 °C. A uma profundidade de 3 km, é possível atingir uma temperatura suficiente para aquecer a água até ao seu ponto de ebulição [9]. Entretanto, a disponibilidade deste recurso torna-se escassa devido à dificuldade e custos associados à perfuração do sub-solo a profundidades que permitam atingir temperaturas favoráveis. Esta fonte pode ser utilizada directamente para aquecimento, ou indirectamente na produção de vapor que acciona uma turbina e gerador para produzir electricidade [10]. Apenas a última aplicação será analisada neste trabalho. Nos últimos 20 a 25 anos, a produção de electricidade a partir de fontes geotérmicas teve um crescimento significativo atingindo, em 2007, cerca de 10 GWe de potência instalada a nível mundial [11].

### 2.6. Energia Hídrica

A energia hídrica é uma fonte limpa, renovável e fiável, permitindo o armazenamento energético e posterior utilização quando necessário, tornando-se num recurso com grande disponibilidade. O aproveitamento desta fonte renovável é feito através da conversão da energia cinética contida na água dos rios e da energia potencial pela altura de queda em energia eléctrica. O processo é feito pela libertação da água, que normalmente se encontra armazenada em albufeiras, sendo esta direccionada para uma turbina hidráulica de modo a accionar um gerador eléctrico [12]. É um recurso com grande disponibilidade geográfica, existindo a nível mundial cerca de 720 GW de potência instalada [13].

### 2.7. Hidrogénio

O hidrogénio é uma substância abundante no planeta, devido à sua presença na molécula de água que cobre cerca de 70 % da superfície terrestre. Trata-se de uma energia limpa que possibilita a produção de electricidade através de células de combustível de hidrogénio. Dois tipos de células de combustível serão considerados na análise do hidrogénio como fonte renovável - as células de combustível de ácido fosfórico e de óxido sólido (material cerâmico, óxido de zircónio e óxido de ítrio). O primeiro tipo representa a primeira geração de células de combustível comerciais. No entanto, apesar do seu bom desempenho, este tipo de células revelou pouca viabilidade. As células de combustível de óxido sólido tornaram-se muito mais atractivas. Com unidades com capacidades de 5 a 250 kW, estas células são acessíveis para pequenos consumidores tornando-se adequadas para produção descentralizada [14].

## 3. Avaliação da Sustentabilidade

Para a avaliação da sustentabilidade de um processo de conversão de energia, é necessário recorrer a indicadores de estado que definam e quantifiquem os subsistemas associados ao processo. Para propriedades de um sistema que não sejam directamente mensuráveis, recorrem-se a ferramentas de avaliação com a finalidade de obter os respectivos indicadores. Do ponto de vista de sustentabilidade tecnológica, os indicadores devem quantificar o processo a nível ambiental e de desempenho técnico, ou seja, devem concentrar-se no impacto que a tecnologia tem no ambiente, os custos associados, a eficiência de conversão e a longevidade da tecnologia. Dos vários indicadores existentes devem escolher-se os que melhor representam e quantificam estes parâmetros. Escolhidos os indicadores adequados, é formulado um índice que permite quantificar a sustentabilidade de cada processo de conversão de energia.

### 3.1. Indicadores para a avaliação da sustentabilidade

Neste estudo foram seleccionados 9 indicadores para descrever os vários processos de conversão de energia. Estes equadram-se em 4 grupos correspondendo cada grupo a um sub-sistema distinto. Os indicadores utilizados dividem-se em:

#### *Indicadores de desempenho tecnológico*

- Eficiência de conversão de energia
- Tempo de vida
- Período de retorno de energia

#### *Indicadores económicos*

- Custo capital da tecnologia
- Custo de geração de electricidade

#### *Indicadores ambientais*

- Emissão de Gases com Efeito de Estufa (CO<sub>2</sub>)
- Área ocupada

#### *Indicadores Sociais*

- Criação de emprego
- Aceitação social

### 3.2. Formulação do índice de sustentabilidade

Após a selecção dos indicadores que caracterizam o processo de conversão, é necessário relacioná-los de modo a que sejam expressos num único valor para quantificar a sua sustentabilidade. Essa relação obtém-se através da formulação de um índice de sustentabilidade. Para a formulação de um índice de sustentabilidade é utilizada uma expressão matemática sugerida por [15]. Para isso, é necessário atribuir uma função de pertença  $q(x_i)$  para cada indicador  $x_i$ . Para cada indicador, deve-se:

- Seleccionar os valores máximo,  $\max(x_i)$ , e mínimo,  $\min(x_i)$  de cada indicador, separadamente para as gamas de valores mínimos e de valores máximos.
- Indicar se a função  $q(x_i)$  cresce ou decresce com o aumento de  $x_i$ . Consoante a variação da função de pertença  $q(x_i)$  com o indicador, seleccionar a expressão adequada.

Se a função de pertença  $q(x_i)$  aumentar com o aumento do indicador  $x_i$ , a sua relação é expressa por:

$$q(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{if } x_i \leq \min(x_i) \\ \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} & \text{if } \min(x_i) < x_i < \max(x_i) \\ 1 & \text{if } x_i \geq \max(x_i) \end{cases} \quad (1)$$

Para o caso da função de pertença  $q(x_i)$  diminuir com o aumento do indicador  $x_i$ , a expressão virá:

$$q(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \leq \min(x_i) \\ 1 - \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} & \text{if } \min(x_i) < x_i < \max(x_i) \\ 0 & \text{if } x_i \geq \max(x_i) \end{cases} \quad (2)$$

O índice de sustentabilidade ( $Q$ ) é dado pela soma dos vários indicadores tendo em conta o peso ( $w_i$ ) que cada um tem na formulação da expressão matemática do índice. Considerando  $m$  indicadores para a caracterização do processo, a expressão matemática final é dada por:

$$Q(q; w) = \sum_{i=1}^m w_i q_i \quad (3)$$

#### 4. Indicadores de sustentabilidade

Os valores numéricos atribuídos a cada indicador, para cada tecnologia, foram recolhidos de vários estudos de avaliação efectuados por outros autores.

##### 4.1. Eficiência de geração de electricidade

A eficiência de geração de electricidade das tecnologias de energias renováveis é um indicador do quanto a energia a ser convertida é definitivamente aproveitada. Uma gama de valores para este indicador foi adquirida para cada tecnologia. Para as várias tecnologias os valores para as respectivas eficiências foram recolhidos de [14,16-18]. Para a energia dos oceanos apenas foi considerado um valor devido à falta de informação sobre esta tecnologia. A gama de valores da eficiência de conversão eléctrica para cada tecnologia encontra-se indicada na Figura 1.

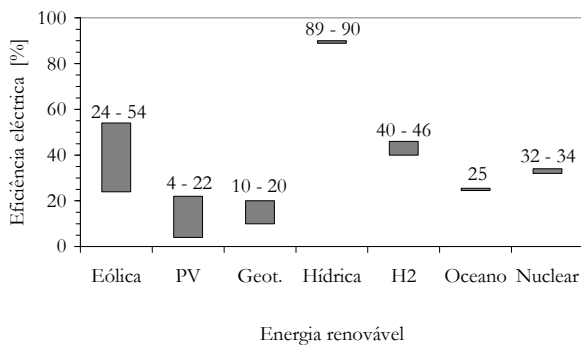


Figura 1: Gama de valores da eficiência de conversão em energia eléctrica por tecnologia.

##### 4.2. Tempo de vida

O tempo de vida é um indicador que quantifica a durabilidade da tecnologia, indicando o período de tempo em que se encontra em operação. Devido à longevidade associada às tecnologias, o tempo de vida é dado em anos. A Figura 2 apresenta os valores do tempo de vida para cada tecnologia [12,14,17,19-20].

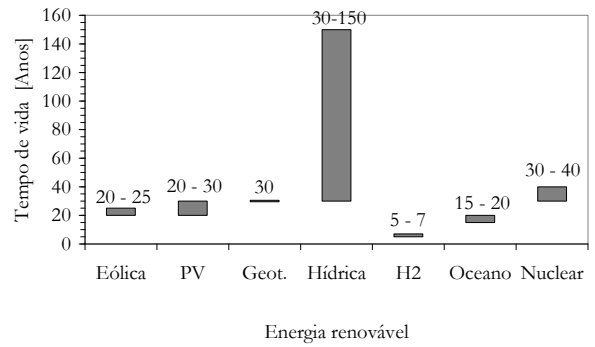


Figura 2: Gama de valores do tempo de vida por tecnologia.

##### 4.3. Período de Retorno de energia

O período de retorno de energia (*Energy Pay-Back Time - EPBT*) é o tempo necessário para uma tecnologia gerar a energia que foi necessária para o seu fabrico e instalação. Este indicador permite saber qual o seu tempo de retorno. Assim que este período é completado, toda a energia gerada a partir desse momento é lucrativa (em termos energéticos). Este indicador é expresso em meses. Os valores obtidos deste indicador para cada tecnologia foram recolhidos de [12, 19-25] e encontram-se representados na Figura 3.

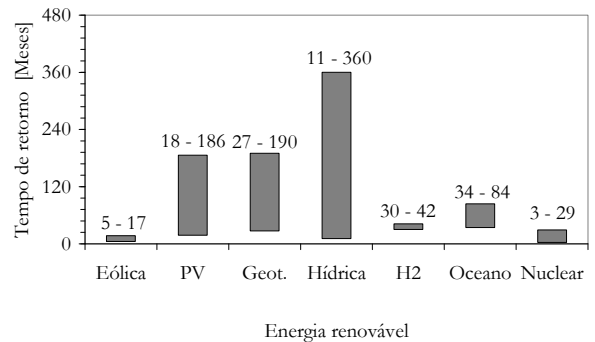


Figura 3: Gama de valores do Período de Retorno de Energia por tecnologia.

##### 4.4. Custo de geração eléctrica

Este indicador quantifica o custo unitário associado à produção de energia eléctrica. É dado em unidade monetária (euro) por unidade de energia eléctrica (kWh). Este indicador tem em conta todos os custos associados à respectiva tecnologia e a energia por ele produzida durante determinado período de tempo. Os valores recolhidos foram obtidos em [12,14,16,17,19-20,26-28]. A Figura 4 apresenta a gama de valores correspondente a este indicador.

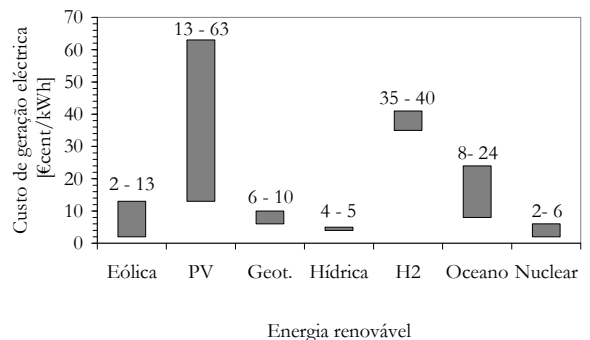


Figura 4: Gama de valores do custo de geração eléctrica por tecnologia.

#### 4.5. Custo Capital

O custo capital é um indicador económico que avalia o custo da instalação tecnológica destinada à conversão de energia tendo em conta a sua capacidade de geração eléctrica, ou seja a sua potência nominal. Este indicador é dado em unidade monetária (euro) por unidade de potência eléctrica (MW). Na Figura 5 encontram-se os valores deste indicador para cada tecnologia obtidos em [14, 30-32].

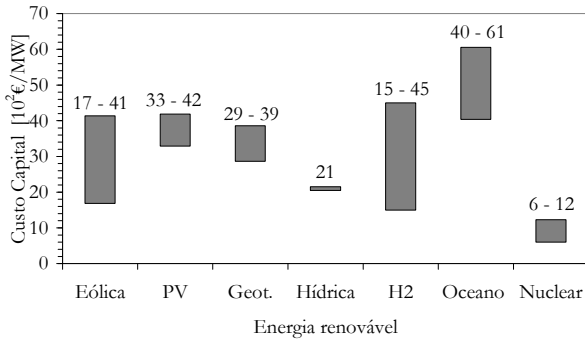


Figura 5: Gama de valores do Custo Capital por tecnologia.

#### 4.6. Emissão de Gases com Efeito de Estufa

As emissões de gases com efeito de estufa têm sido a principal razão pela qual surgiu a necessidade de recorrer à utilização de energias renováveis. Trata-se de um indicador que quantifica o impacto ambiental provocado pelas emissões de gases nocivos durante a utilização dos dispositivos de conversão de energia. Para uma tecnologia ser sustentável, as emissões de gases com efeito de estufa devem ser mínimas de modo a não alterar negativamente o ambiente como tem acontecido com a utilização de combustíveis fósseis para produção de electricidade. São várias as substâncias nocivas que constituem os gases com efeito de estufa. No entanto, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é a substância com mais peso na composição dos gases, sendo a única a ser considerada nesta avaliação. O indicador é avaliado pela massa de CO<sub>2</sub> emitida para uma dada quantidade de energia eléctrica produzida durante o tempo de vida da tecnologia. Na Figura 6 encontram-se os valores das emissões de CO<sub>2</sub> por tecnologia obtidos em [12,14,16-17,34-38].

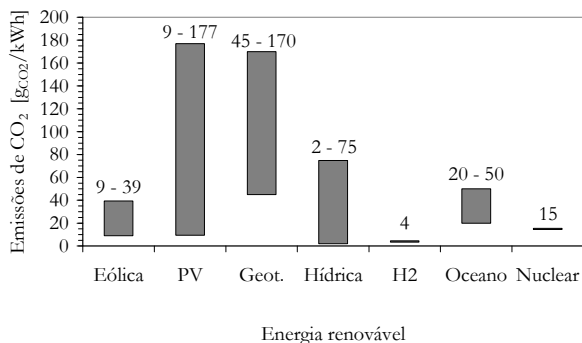


Figura 6: Gama de valores das Emissões de Gases com Efeito de Estufa por tecnologia.

#### 4.7. Área Ocupada

Este indicador ambiental quantifica a área ocupada por instalação tecnológica. Caso a área ocupada seja elevada, poderá haver consequências indesejáveis a nível ambiental

devido à destruição de vários ecossistemas. Por esta razão, a área ocupada pelas infra-estruturas constituintes das tecnologias de conversão energética deverá ser a menor possível. Este indicador revela a área necessária para a produção de uma dada quantidade de energia por ano. Os valores correspondentes a este indicador encontram-se na Figura 7 e foram recolhidos de [14,16,34,39-40].

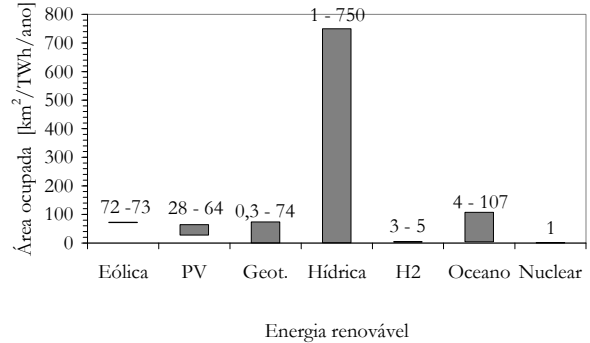


Figura 7: Gama de valores da Área Ocupada por tecnologia.

#### 4.8. Criação de emprego

A criação de emprego é um indicador social que quantifica o número de postos de trabalho originados pela construção de um sistema tecnológico de conversão energética. O impacto que as energias de fonte renovável produzem na sociedade é de importância significativa para a sua sustentabilidade, uma vez que o seu funcionamento pode ser obstruído pela população caso a tecnologia de conversão não traga vantagens para esta. Deste modo, a criação de emprego torna-se num bom indicador para avaliar o impacto social sendo expresso em postos de trabalho por unidade de potência instalada. Os valores deste indicador foram obtidos em [41-45] e estão representados na Figura 8.

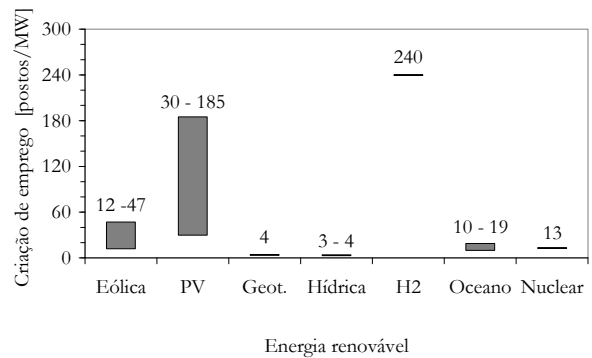


Figura 8: Gama de valores da Criação de Emprego por tecnologia.

#### 4.9. Aceitação social

A aceitação social de qualquer fonte de energia envolve tanto a atitude geral em relação à tecnologia de captação de energia assim como as decisões de implantação dos sistemas a nível local, regional ou até mesmo nacional. É neste contexto que se encontra a formulação mais recente do conceito de "aceitação social" ligado às energias, denominado "modelo triângulo". Este modelo distingue três dimensões-chave da aceitação social: a aceitação sócio-política, aceitação da comunidade e aceitação do mercado [46]. A aceitação sócio-política refere-se a aceitação das tecnologias e políticas a um nível mais geral. Esta componente não se limita aos níveis de aceitação

pelo público em geral, mas inclui a aceitação pelas partes interessadas e decisores políticos. Os vários agentes políticos e privados envolvidos na discussão são cruciais no planeamento e na promoção de iniciativas locais. A aceitação da comunidade refere-se à aceitação de projectos específicos a nível local das populações potencialmente afectadas, das principais partes interessadas locais e das autoridades locais. É nesta componente onde o debate social em torno do sistema de captação de energia adequado à região em particular surge e se desenvolve. A aceitação do mercado refere-se ao processo pelo qual as partes comerciais adoptam e apoiam (ou não) uma implantação de um determinado sistema tecnológico de captação de energia.

Os valores deste indicador foram obtidos em [46] e encontram-se representados na Figura 9. Apresentam-se somente a percentagem dos indivíduos a favor (valor mínimo) e soma dos indivíduos a favor e indecisos (valor máximo) da instalação do sistema tecnológico de captação de uma determinada fonte energética. Reside na indicação da avaliação dos níveis de apoio público para diferentes tipos de fontes de energia obtidos por meio de sondagens e inquéritos de atitude realizados pelo Standard Eurobarometer Survey (EB) sobre a população da União Europeia (UE) (CE, 2006, 2007). No caso da energia geotérmica, [47] indica que esta fonte de energia possui uma reduzida aceitação social, considerando-se um valor de 40% que não prejudica em demasia o índice, porém também não o beneficia face às restantes fontes de energia. No oposto, em [48] é indicado que os sistemas de captação da energia do hidrogénio possuem uma elevada aceitação social, pois trata-se de uma fonte de energia limpa sem qualquer tipo de controvérsia, embora seja relatado o baixo nível de conhecimento sobre o hidrogénio. Neste sentido, é considerado um valor de 60% de aceitação global, que não prejudica nem beneficia em demasia a captação de energia desta fonte.

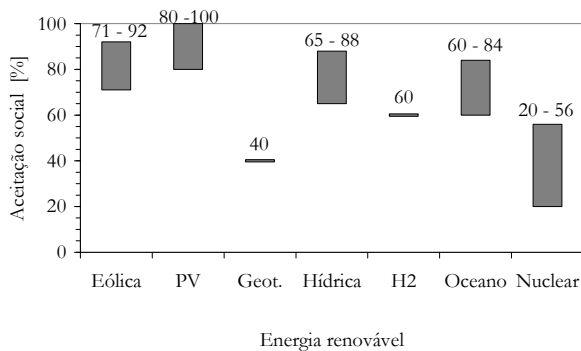


Figura 9: Gama de valores da Aceitação Social por tecnologia.

## 5. Aplicação do índice de sustentabilidade

Neste secção é descrita a aplicação do índice de sustentabilidade às várias tecnologias de conversão de energia com fonte renovável utilizando a formulação apresentada em 3.2. Atendendo à gama de valores obtidos, são calculados dois valores para os índices de sustentabilidade, um utilizando os valores mínimos e outro relativo aos valores máximos. Para indicadores que apresentem apenas um valor, esse mesmo valor será utilizado em ambas as situações. São considerados dois

casos de estudo distintos. No primeiro caso é assumida a mesma ponderação para cada um dos indicadores. Dados nove indicadores e de modo a terem igual importância no cálculo do índice final, cada um terá o mesmo peso ( $w_i = 0,11$ ). Para o segundo caso, é atribuído maior peso a indicadores que revelam ser mais importantes na descrição da sustentabilidade das tecnologias. Neste estudo considera-se que a eficiência, o custo de geração eléctrica, as emissões de CO<sub>2</sub>, o tempo de vida e a aceitação social são os indicadores mais decisivos na quantificação da sustentabilidade de um processo [14]. Por isso, a estes indicadores é atribuído um peso superior que aos restantes. Os respectivos pesos para os dois casos encontram-se na Tabela 1. Consoante a sustentabilidade do processo aumenta ou diminui com o indicador, será seleccionada a função de pertinência respectivamente indicada pela expressão (1) ou (2) (ver Tabela 2). Nas expressões (1) e (2) são utilizados como limites máximo e mínimo, respectivamente o maior e menor valor encontrado para esse indicador, tendo em conta a gama de valores correspondente a todas as tecnologias. Assim, para cada indicador haverá sempre uma tecnologia cuja função de pertinência será 0 e outra cuja mesma função será 1.

Tabela 1: Peso  $w_i$  de cada indicador para os casos de estudo.

Indicador, $q_i$		$w_i$ (%)	
		Caso 1	Caso 2
$q_1$	Eficiência de conversão de energia	11,11	14,81
$q_2$	Tempo de vida		14,81
$q_3$	Periodo de retorno de energia		6,49
$q_4$	Custo capital da tecnologia		6,49
$q_5$	Custo de geração de electricidade		14,81
$q_6$	Emissões de CO <sub>2</sub>		14,81
$q_7$	Área ocupada		6,49
$q_8$	Criação de emprego		6,49
$q_9$	Aceitação social		14,81

Tabela 2: Variação da sustentabilidade do processo com o indicador.

Indicador		Sustentabilidade	Exp.
$q_1$	Eficiência de conversão de energia	Aumenta	(1)
$q_2$	Tempo de vida		
$q_3$	Periodo de retorno de energia	Diminui	(2)
$q_4$	Custo capital da tecnologia		
$q_5$	Custo de geração de electricidade		
$q_6$	Emissão de CO <sub>2</sub>		
$q_7$	Área ocupada	Aumenta	(1)
$q_8$	Criação de emprego		
$q_9$	Aceitação social	Aumenta	(1)

## 6. Análise e discussão de resultados

Com base nos resultados expostos nas Figuras 10 e 11, onde se encontram os índices finais obtidos para os valores mínimos e máximos, respectivamente, de cada tecnologia para os casos de estudo 1 e 2, as seguintes considerações podem ser elaboradas:

- (1) A elevada eficiência e tempo de vida dos sistemas hídricos contribuem significativamente para o índice total;
- (2) O reduzido tempo de retorno do investimento (EPBT - *Energy Pay Back Time*) e baixo custo de geração de electricidade associado aos sistemas eólicos e nucleares contribuem para os respectivos índices totais de sustentabilidade;

(3) O custo de capital necessário pela energia produzida penaliza os índices de sustentabilidade dos sistemas fotovoltaicos, geotérmicos e dos oceanos (ondas e marés);

(4) As reduzidas emissões de CO<sub>2</sub> associadas aos sistemas eólicos, hídricos, de hidrogénio e nucleares favorecem os seus índices de sustentabilidade associados a este factor ambiental;

(5) A menor área ocupada por sistemas geotérmicos, de hidrogénio, dos oceanos e nucleares pauta também a evolução do índice global de sustentabilidade;

(6) O número de postos de emprego gerados pelos sistemas de conversão de hidrogénio em electricidade, e em menor escala pelos sistemas fotovoltaicos, potenciam este índice;

(7) A aceitação social é menos controversa na implantação de sistemas eólicos, fotovoltaicos e hídricos;

(8) Embora a ponderação dos índices tenha sido significativamente alterada entre os casos de estudo n.º 1 e n.º 2, verifica-se que no cômputo geral os resultados obtidos são similares.

Na Figura 12 é apresentada a variação do indicador global de sustentabilidade para os casos de estudo n.º 1 e n.º 2. A análise desta figura permite sugerir uma hierarquia do ranking de sustentabilidade de tecnologias e com este propor um mix de tecnologias de conversão de energia em energia eléctrica, face aos pressupostos utilizados para definição dos índices. Mesmo considerando a alteração da ponderação entre o caso de estudo n.º 1 e n.º 2, o posicionamento em termos de sustentabilidade mantém-se. Assim, as fontes de energia eólica, hídrica e nuclear são as que se posicionam na dianteira de um futuro sustentável para o abastecimento de energia eléctrica. Caso a energia nuclear, face à controvérsia que gera, fosse excluída desta comparação, as fontes de energia mais sustentáveis que integrariam a linha da frente seriam o hidrogénio e a solar fotovoltaica.

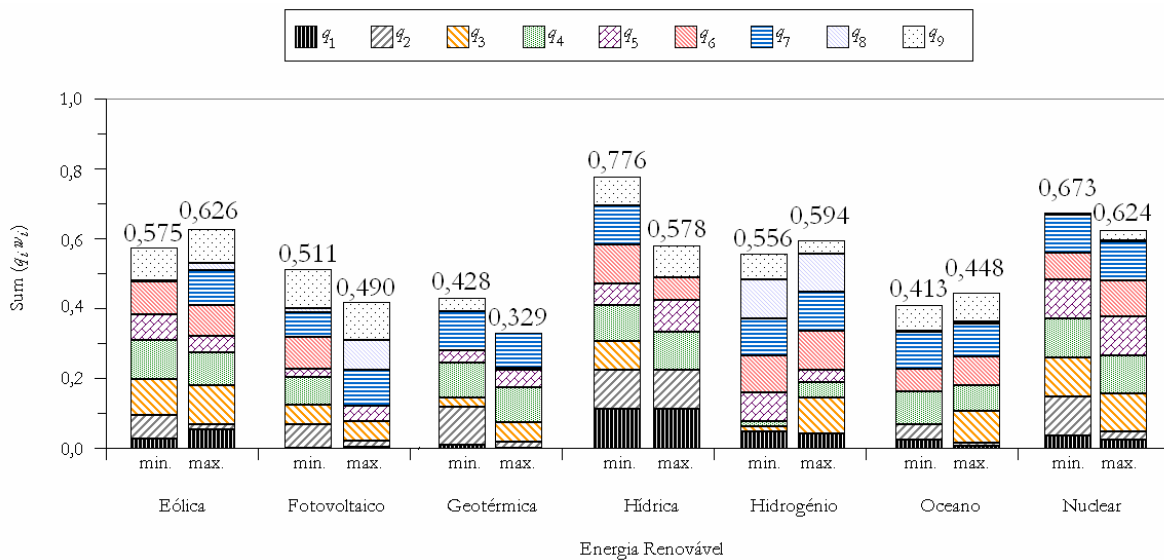


Figura 10: Índice de sustentabilidade de cada tecnologia para a gama de valores mínimos e máximos - Caso 1.

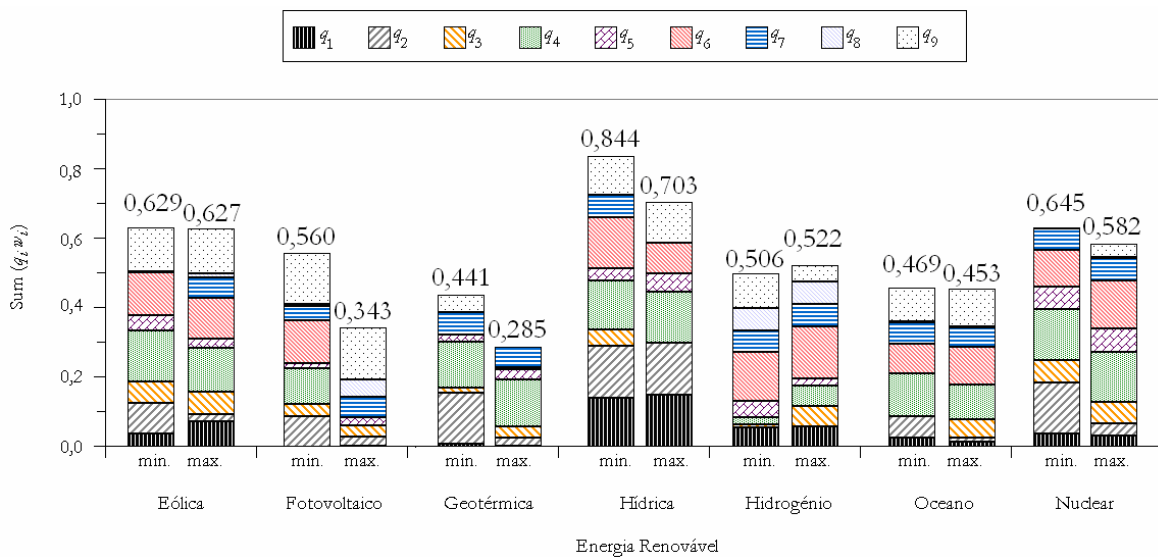


Figura 11: Índice de sustentabilidade de cada tecnologia para a gama de valores mínimos e máximos - Caso 2.

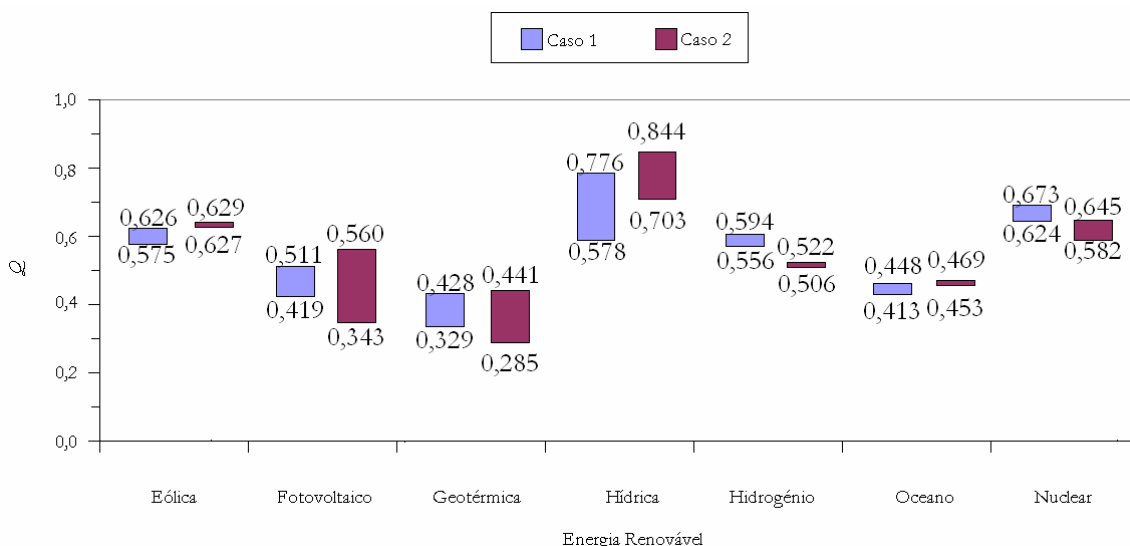


Figura 12: Variação do índice de sustentabilidade para os casos de estudo.

## 7. Conclusões

O trabalho exposto no presente artigo utiliza um amplo conjunto de indicadores que caracterizam os sub-sistemas (desempenho tecnológico, ambiental, social e económico) subjacentes às tecnologias actuais de geração de electricidade a partir de fontes renováveis. A análise destes sub-sistemas foi efectuada recorrendo a 9 indicadores adequados para a medição e quantificação das suas propriedades. Para cada tecnologia, vários valores foram recolhidos tendo sido considerados, para cada indicador, os valores máximo e mínimo encontrados ao longo respectiva literatura.

Estes indicadores podem ser utilizados individualmente para fins comparativos, permitindo esboçar uma hierarquia do ranking de tecnologias dependendo da ponderação de cada um dos factores. Considerando um mix de tecnologias de conversão de energia em energia eléctrica, face aos pressupostos utilizados para definição dos índices, as fontes de energia eólica, hídrica e nuclear são as que se posicionam na dianteira de um futuro sustentável para o abastecimento de energia eléctrica. Aqui há que realçar que a aceitação social da tecnologia nuclear foi assente em dados recolhidos anteriormente ao desastre na central de Fukushima. No presente dia, provavelmente a aceitação social desta tecnologia seria mais reduzida afectando o índice global de sustentabilidade. Se na análise efectuada a energia nuclear não integrasse este mix, as fontes de energia mais sustentáveis para além da eólica e a hídrica já mencionadas seriam o hidrogénio e a fotovoltaica. Porém, há que destacar a elevada densidade energética do nuclear face às restantes fontes assim como enfatizar a evolução que a tecnologia nuclear (centrais de Geração IV) tem sentido, reduzindo a possibilidade de grandes fugas de radioactividade, as dimensões do confinamento necessário, e o tempo de decaimento da radioactividade de resíduos nucleares.

Este trabalho tem como propósito fornecer uma actualização sobre a gama de variação dos diferentes indicadores de sustentabilidade. Isto face à constante evolução tecnológica que permite melhorar a eficiência dos sistemas de conversão de energia e reduzir as suas emissões de gases de estufa, da alteração dos custos de instalação e operação dos sistemas, das mudanças de

mentalidade da sociedade que condicionam a implementação de um determinado tipo de sistema em detrimento de outro. Assim, este trabalho pretende dar um contributo no debate actual e futuro sobre a produção de energia eléctrica a partir de fontes de energia renovável.

## Referências

- [1] WWEA, *World Wind Energy Report 2009*, World Wind Energy Association (WWEA), February 2010.
- [2] REN21, *Renewable 2010 - Global Status Report*, Renewable Energy Policy Network for the 21<sup>st</sup> Century, 2010.
- [3] DGEG, *Energia Solar*, Direcção-Geral de Energia e Geologia (DGEG), 2010.
- [4] WNA, *Another drop in nuclear generation*, World Nuclear News, World Nuclear Association (WNA), May 2010.
- [5] EIA, *Summary status for the US*, U.S. Energy Information Administration (EIA), January 2010.
- [6] E. Beardsley, *France Presses Ahead with Nuclear Power*, NPR, 2006.
- [7] J.M.B.P. Cruz, A.J.N.A. Sarmiento, *Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais*, Instituto do Ambiente, 2004.
- [8] WavEC, *Potential and Strategy for the Development of Wave Energy in Portugal*, Wave Energy Centre (WavEC), 2004.
- [9] F. A. Farret, M. G. Simões, *Integration of alternative sources of energy*, Wiley-IEEE Press, 2006.
- [10] B. Erdogmus *et al.*, "Economic assessment of geothermal district heating systems: A case study of Balcova-Narlidere, Turkey", *Energy and Buildings*, **38**(9): 1053-1059, 2006.
- [11] D. L. Gallup, "Production engineering in geothermal technology: A review", *Geothermics* **38**(3):326-334, 2009.
- [12] Varun *et al.*, "Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**(9):2716-2721, 2009.
- [13] J. K. Kaldellis, "Critical evaluation of the hydropower applications in Greece", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12**(1):218-234, 2008.

- [14] N. H. Afgan, M. G. Carvalho, "Sustainability assessment of hydrogen energy systems", *International Journal of Hydrogen Energy* **29**(13):1327-1342, 2004.
- [15] K. Hanjalic, R. van de Krol, A. Lekic, *Sustainable Energy Technologies, Options and Prospects*, Springer, 2008.
- [16] A. Evans *et al.*, "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**(5):1082-1088, 2009.
- [17] S. Roth *et al.*, "Sustainability of electricity supply technology portfolio", *Annals of Nuclear Energy* **36**(3):409-416, 2009.
- [18] A. Brito, J. Huckerby, *Implementing Agreement on Ocean Energy Systems*, International Energy Agency (IEA), Annual Report, 2010.
- [19] S. Banerjee, L. J. Duckers, R. Blanchard, B. K. Choudhury, *Life Cycle Analysis of Selected Solar and Wave Energy Systems*, Advances in Energy Research, 2006.
- [20] R. Parker *et al.*, "Energy and carbon audit of an offshore wave energy converter", in *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 221, pp. 1119-1130, 2007.
- [21] H. C. Soerensen, S. Naef, S. Anderberg, M. Z. Hauschild, "Life Cycle Assessment of the Wave Energy Converter: Wave Dragon", in *Proc. Of International Conference on Ocean Energy*, Bremerhaven, 2007.
- [22] A. Vob, *A Comparative Assessment of Electricity Generation Options from an ecological and sustainability viewpoint*, Institute of Energy Economics and Rational Use of Energy, University of Stuttgart.
- [23] WNA, *Energy Analysis of Power Systems*, World Nuclear Association (WNA), January 2011.
- [24] J. Randolph, G. M. Masters, *Energy for Sustainability: Technology, Planning Policy*, Island Press, 2008.
- [25] A. J. Mansure, D. A. Blankenship, "Energy Return in Energy Investment, An Important Figure-Of-Merit For Assessing Energy Alternatives", in *Proc. 25<sup>th</sup> Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California, February 1-3, 2010.
- [26] G. J. Dalton *et al.*, "Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America", *Renewable Energy* **35**(2):443-455, 2010.
- [27] D. Dunnett, J. S. Wallace, "Electricity generation from wave power in Canada", *Renewable Energy* **34**(1):179-195, 2009.
- [28] G. Allan *et al.*, "Levelised costs of Wave and Tidal energy in the UK: Cost competitiveness and the importance of "banded" Renewables Obligation Certificates", *Energy Policy* **39**(1):23-39, 2011.
- [29] T. J. Lee *et al.*, "Strategic environments for nuclear energy innovation in the next half century", *Progress in Nuclear Energy* **49**(5):397-408, 2007.
- [30] E. Denny, "The economics of tidal energy", *Energy Policy* **37**(5):1914-1924, 2009.
- [31] WNA, *The Economics of Nuclear Power*, World Nuclear Association, url: <http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html> accessed: [28-04-2011].
- [32] P. Lako, *Marine Energy*, International Energy Agency (IEA), Technology Brief E13 November 2010.
- [33] EIA, *Updated Capital Cost Estimates for Electricity Generation Plants*, Energy Information Administration (EIA), Washington November 2010.
- [34] L. Gagnon *et al.*, "Life-cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001", *Energy Policy* **30**(14):1267-1278, 2002.
- [35] R. Kannan *et al.*, "Life cycle assessment study of solar PV systems: An example of a 2.7 kWp distributed solar PV system in Singapore", *Solar Energy* **80**(5):555-563, 2006.
- [36] A. F. Sherwani *et al.*, "Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**(1):540-544, 2010.
- [37] Varun, I.K. Bhat, R. Prakash, "LCA of renewable energy for electricity generation systems--A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**(5):1067-1073, 2009.
- [38] M. Raugei, P. Frankl, "Life cycle impacts and costs of photovoltaic systems: Current state of the art and future outlooks", *Energy* **34**(3):392-399, 2009.
- [39] F. Evrendilek, C. Ertekin, "Assessing the potential of renewable energy sources in Turkey", *Renewable Energy* **28**(15):2303-2315, 2003.
- [40] F. O. Rourke *et al.*, "Tidal energy update 2009", *Applied Energy* **87**(2):398-409, 2010.
- [41] L. Frantzis, "Job Creation Opportunities in Hydropower", *National Hydropower Association Annual Conference*, 2010.
- [42] G. J. Dalton, T. Lewis, "Metrics for measuring job creation by renewable energy technologies, using Ireland as a case study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15**:2123-2133, 2011.
- [43] J. M. Rinebold, T. Drajer, A. Brzozowski, *A National "Green Energy" Economic Stimulus Plan Based in Investment in the Hydrogen and Fuel Cell Industry*, The Connecticut Center for Advance Technology, Inc. 2009.
- [44] N. Peters, *Promoting Solar Jobs: A policy framework for creating solar jobs in New Jersey*, New Jersey 2010.
- [45] C. Plowman, *U.S. Job Creation Due to Nuclear Power Resurgence in United States*, U.S. Department of Energy 2004.
- [46] EWEA, *Wind Energy – The Facts: Chapter 6: Social acceptance of wind energy and wind farms*, European Wind Energy Association (EWEA), Earthscan Ltd., March 2009.
- [47] P. Ungemach, Conclusions of the Workshop: Increasing policy makers awareness and public acceptance, From E. Kontoleon (eds.), in *ENGINE Workshop 6: Increasing policy makers awareness and the public acceptance*, ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe (ENGINE), Athens, Greece, September 2007.
- [48] B. van Bree, I. Bunzeck, *WP6: D6.1: Social acceptance of hydrogen demonstration projects*, NextHyLights Industry and Institute partners, Supporting Action of the Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), New Energy World JTI framework, European Commission, August 2010.