SISTEMA DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Alcides Pereira da Silva Jr[1], Décio Estevão do Nascimento [2], Márcio Eduardo Zuba [3]

1 PPGPGP - Programa De Pós-Graduação Em Planejamento E Governança Pública
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba – Sede Centro
Curitiba – Paraná - Brasil

2 PPGPGP - Programa De Pós-Graduação Em Planejamento E Governança Pública
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba – Sede Centro
Curitiba – Paraná – Brasil

3 PPGPGP - Programa De Pós-Graduação Em Planejamento E Governança Pública
Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba – Sede Centro
Curitiba – Paraná - Brasil

E-mails: alcidesjunior@alunos.utfpr.edu.br, decio@utfpr.edu.br, marciozuba@ufpr.brj

Resumo: *A abertura e modernização do mercado energético propiciam o surgimento de inovações tecnológicas no setor, destacando-se, entre as fontes renováveis, a solar fotovoltaica e a autoprodução de energia elétrica. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a literatura relacionada ao sistema de inovação tecnológica (SIT) da geração distribuída fotovoltaica. Para atingir o objetivo foi realizado um estudo de mapeamento sistemático de literatura apoiado na metodologia de snowball sampling (bola de neve). Como principais resultados, destaca-se que o processo identificou 85 artigos, sendo estes classificados em relação à relevância, seus autores, origens e periódicos que mais publicaram sobre o tema, verificando-se as abordagens tecnológicas, os setores que as pesquisas objetivaram atingir e o levantamento das formas em que sistemas de inovação tecnológica foram aplicadas nos artigos que compõem o portfólio.*

Palavras-chave*: Geração distribuída; Energia solar; Sistema de Inovação Tecnológica; Revisão sistemática da literatura.*

INTRODUÇÃO

A sociedade demanda, cada vez mais, eletricidade e calor para realizar suas atividades diárias, o que leva ao aumento do consumo de energia. Se as tendências atuais de consumo se mantiverem, a demanda global de energia dobrará até 2050 (SENKUS et al., 2021).

Por outro lado, a ciência e a prática demonstram que uma forte onda de inovação está crescendo no setor energético, resultando em uma mudança disruptiva na eficiência e na redução do custo na produção de energia limpa (SENKUS et al., 2021).

Em meio à evolução da tecnologia digital, a redução dos custos de energia renovável descentralizada e a operação de recursos energéticos distribuídos (REDs) mudaram o papel dos consumidores no mercado de energia elétrica (MARTINS; BRANCO; HALLACK, 2022). O paradigma do consumidor como participante passivo foi substituído pelo conceito de *prosumer* (ou prosumidor, no neologismo em português), que é um consumidor participativo na produção descentralizada (MARTINS; BRANCO; HALLACK, 2022).

O consumo de energia residencial está mudando à medida que surgem novas tecnologias e políticas visando a transição para a energia limpa (KIM; PARK, 2021). Entre as tecnologias que exploram fontes renováveis, a solar fotovoltaica, juntamente com a energia eólica, é a mais importante desde o início deste século (PINHEIRO et al., 2020). Destaca-se o aumento do interesse dos consumidores, apoiados pelo conceito de geração distribuída, ao investirem em tecnologia solar fotovoltaica, tornando o uso dessa fonte de energia um mercado promissor (PINHEIRO et al., 2020).

Essas mudanças exigem ajustes nos mercados de energia elétrica (MARTINS; BRANCO; HALLACK, 2022). Os órgãos reguladores precisam entender a realidade de cada local à luz dessas novas tecnologias e, consequentemente, traçar estratégias para adaptar modelos de negócios, políticas públicas e instrumentos regulatórios, para promover soluções para um novo equilíbrio nesse mercado em mudança (MARTINS; BRANCO; HALLACK, 2022).

Para Jacobsson e Bergek (2004), o sucesso de uma nova tecnologia na transformação do sistema energético não é determinado apenas por suas características tecnológicas, mas também leva em conta o sistema social que desenvolve, difunde, implementa ou rejeita novas tecnologias. Por várias razões, portanto, o sistema de energia precisa ser transformado em um sistema sustentável, tanto em termos de oferta quanto de demanda (BERGEK; HEKKERT; JACOBSSON, 2008). Para esses autores, essa transformação provavelmente envolverá tecnologias que utilizam fontes de energia renováveis, o que, necessariamente, envolve um processo de desenvolvimento e difusão "demorado (várias décadas), incerto (em

termos de mercado, tecnologia e política) e doloroso (muitos obstáculos e falhas)" (BERGEK; HEKKERT; JACOBSSON, 2008, p. 79, tradução nossa). Esse processo de desenvolvimento e difusão de uma nova tecnologia específica se reflete na formação e evolução dos sistemas de inovação tecnológica (SIT) (BERGEK; HEKKERT; JACOBSSON, 2008).

Nesse contexto, esta pesquisa busca caracterizar a literatura relacionada ao Sistema de Inovação Tecnológica da geração distribuída fotovoltaica. A pesquisa se justifica pelo crescente interesse na transição energética e pelos temas geração distribuída (GD) e energia fotovoltaica (FV), e a necessidade de se obter uma base consistente de material para análise.

SISTEMA DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE FONTE SOLAR

Um sistema é definido geralmente como uma configuração de componentes conectados que, juntos, constituem uma rede de relacionamentos (BERGEK; HEKKERT; JACOBSSON, 2008). A perspectiva de "funções" de um sistema de inovação tecnológica busca compreender as contribuições, positivas ou negativas, de um ou mais de seus constituintes para o objetivo principal do sistema, que é desenvolver, disseminar e implementar inovações em um determinado campo da tecnologia (BERGEK, 2002).

Para Hekkert *et al*. (2007), o processo, conjunto e interativo, de desenvolvimento de tecnologia em interação com o sistema em que está inserida, chama-se de processo de inovação. A inovação é um determinante fundamental para o crescimento econômico e o desenvolvimento a longo prazo, o que justifica a preocupação em acelerar o desenvolvimento desses processos (HEKKERT et al., 2007).

Além da perspectiva de gerar eletricidade e mitigar as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) e suas consequências socioeconômicas, quando realizada em regiões de baixa intensidade de carbono, a adoção das tecnologias que aplicam energia solar fotovoltaica apresenta potencial para mitigar problemas associados à segurança energética (PINHEIRO et al., 2020).

O custo médio da geração de energia solar fotovoltaica caiu 80% nos últimos 13 anos, graças aos avanços em ciência e tecnologia, e o futuro aponta para um custo gradualmente

menor, tendo ainda como vantagem o fato de não estar exposto à volatilidade que caracteriza os custos das fontes hídricas e a gás (D'AMBROSIO; LOSASSO; TERSIGNI, 2021).

Nesse contexto, para que haja uma transição energética adequada, é essencial que, além da remoção de eventuais barreiras regulatórias injustificadas, também sejam avaliados os efeitos econômicos das novas tecnologias para a sustentabilidade financeira do setor e a equidade social de acesso à rede (MARTINS; BRANCO; HALLACK, 2022).

METODOLOGIA

Para a seleção do portfólio bibliográfico esta pesquisa adotou, como metodologia, o Mapeamento Sistemático da Literatura, mediante a abordagem conhecida como *snowball sampling* (ou bola de neve), que propõe o "uso da lista de referências de um artigo ou das citações do artigo para identificar artigos adicionais" (WOHLIN, 2014).

A metodologia de seleção do referencial bibliográfico consiste em uma série de procedimentos sequenciais que se iniciam com a definição do mecanismo de busca dos artigos científicos nas bases escolhidas, seguindo por procedimentos de filtragem até a seleção e análise dos resultados obtidos e que irão compor o portfólio bibliográfico relevante sobre o tema. O processo de levantamento bibliométrico foi estabelecido em 10 etapas, apresentadas a seguir.

Na etapa 1 foram definidos o problema, a pergunta e os objetivos da pesquisa. A seguir, na etapa 2, foram estabelecidos eixos temáticos e a partir deles foram escolhidas palavras-chave e elaborou-se uma *string* de busca preliminar, o que constituiu a etapa 3, para utilização no processo de busca de artigos científicos, utilizando-se aqui da ferramenta Google Acadêmico para o teste de aderência das palavras (etapa 4). Posteriormente, na etapa 5, foi elaborada uma nova *string*, mais ampla e aplicada às bases selecionadas (Web of Science e Scopus). Os resultados obtidos em cada base de dados (ou seja, o banco inicial de artigos) foi exportado para o *software* de gerenciamento bibliográfico Zotero e a organização dos dados foi realizada em planilha Excel, para facilitar a manipulação das informações. Já a etapa 6 consistiu na filtragem dos artigos, iniciando-se com a exclusão de documentos repetidos, algo que pode ocorrer pelo fato de a busca ter sido feita em duas bases de dados. Na sequência foi realizada a leitura flutuante dos artigos disponíveis e o *download* das

seguintes partes: títulos, resumos, palavras-chave e conclusões ou resultados aderentes ao tema da pesquisa. O resultado deste processo de filtragem foi o portfólio bibliográfico mais relevante, ou seminal.

Visando ampliar o portfólio de artigos, foi utilizada a técnica de *snowball sampling* (bola de neve), que consistiu em iterações para trás (com o levantamento de todo o referencial destes documentos até aqui selecionados) e para frente (com o levantamento, via ferramenta de busca Google Acadêmico, de pesquisas que se utilizaram dos artigos selecionados em estudos mais recentes, ou seja, as citações desta base de artigos (etapa 7). A seguir, na etapa 8, aplicou-se um filtro temporal, buscando-se artigos publicados nos últimos seis anos, e os demais filtros já definidos: disponibilidade integral do documento, exclusão de duplicados, leitura flutuante e identificação da aderência ao tema. Obteve-se, assim, um novo portfólio bola de neve, que, somado ao portfólio inicial, constituiu-se no *corpus* dinâmico da pesquisa.

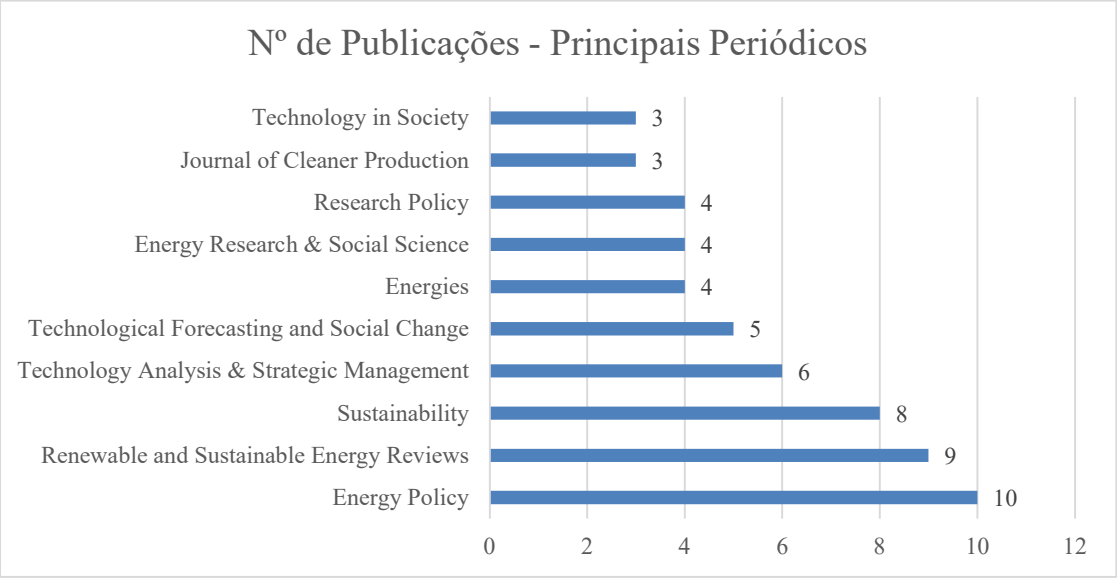
A etapa 9 consistiu o levantamento a partir dos artigos selecionados de todo o referencial bibliográfico utilizado (com exceção de dissertações e teses), com o qual, mediante tabulação de dados, foi possível identificar os autores mais frequentes – considerados, portanto, autores basilares. Os artigos produzidos pelos autores de base mais citados na base do *corpus* dinâmico foram separados e organizados, com os documentos mais relevantes compondo o *corpus* estático (etapa 10 do processo). O conjunto final dos documentos, resultado do levantamento bibliométrico, passou a compor o portfólio bibliográfico do tema de pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a análise dos dados dos artigos selecionados buscou-se avaliá-los quanto à relevância dos periódicos em que foram publicados, quanto ao reconhecimento científico e relevância dos autores, tendências tecnológicas, setores da sociedade mais representativos e, por fim, quanto às aplicações do modelo de abordagem funcional de sistemas de inovação tecnológica. Os 85 artigos foram publicados em 33 periódicos distintos, o que demonstra o interesse nesta área de pesquisa. São considerados periódicos de relevância para a pesquisa

aqueles que publicaram o maior número de artigos do portfólio bibliográfico, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Periódicos em que foram publicados os artigos



Fonte: Autoria própria (2023).

Destacam-se, pela frequência, dez principais periódicos, com no mínimo três publicações cada e que juntos representam 66% das publicações. Os principais periódicos estão destacados na Tabela 1, com suas relevâncias mensuradas a partir de seu *score*, obtido em 2022, nos indicadores Impact Fator e Cite Score, em que se destacam os seguintes Periódicos: Technological Forecasting and Social Change, Journal of Cleaner Production e Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Tabela 1 – Relevância dos periódicos

Periódico	Impact Fator (WoS)	Cite Score (Scopus)	Média
Energies	3,2	5,5	4,4
Sustainability	3,9	5,8	4,9
Technology Analysis & Strategic Management	3,4	7,1	5,3
Energy Research & Social Science	6,7	11,9	9,3
Technology in Society	9,2	11,2	10,2
Research Policy	7,2	15,1	11,2
Energy Policy	9,0	15,2	12,1

Technological Forecasting and Social Change	12,0	17,2	14,6
Journal of Cleaner Production	11,1	18,5	14,8
Renewable and Sustainable Energy Reviews	15,9	26,3	21,1

Fonte: Autoria própria (2023).

Os autores mais relevantes do portfólio bibliográfico incluem, além dos autores da abordagem funcional, outros sete autores considerados basilares ao se estudar o tema sistemas de inovação tecnológicos, conforme o resumo do Quadro 1.

Quadro 1 – Autores basilares

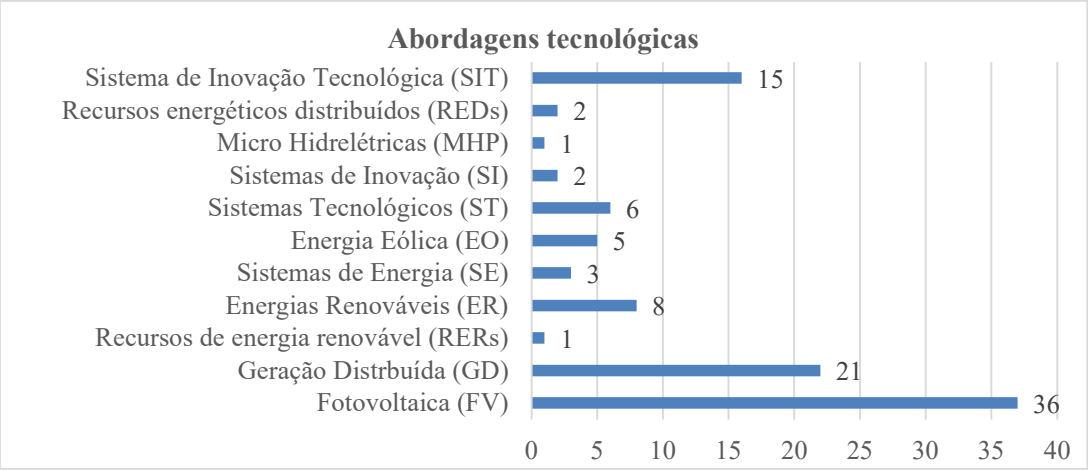
Autor	Área de Pesquisa	Instituição	País
Anna Bergek	Política de Sistemas e Tecnologia de Inovação	Universidade de Tecnologia de Chalmers	Suécia
Staffan Jacobsson	Ciência dos materiais	Universidade Uppsala	Suécia
Bo Carlsson	Escola de Administração	Universidade Western Reserve	EUA
Frank W. Geels	Sistemas de inovação	Universidade de Manchester	Inglaterra
Jochen Markard	Inovação no Setor de Serviços Públicos	Instituto Federal de Ciência e Tecnologia	Suíça
Marko P. Hekkert	Dinâmica de Sistemas de Inovação	Universidade Utrecht	Holanda
Tobias S. Schmidt	Política de Energia e Tecnologia	Instituto de Ciência, Tecnologia e Política	Suíça
Roald A. A. Suurs	Inovação e Ciências Ambientais	Universidade Utrecht	Holanda
Bengt-Åke Lundvall	Negócios e Gestão	Universidade de Aalborg	Dinamarca
Joern Huenteler	Administração, Tecnologia e Economia	Escola Politécnica	Suíça

Fonte: Autoria própria (2023).

Esses autores (10 no total) são pesquisadores e/ou professores dedicados às áreas de inovação e tecnologia sob os aspectos das disciplinas de engenharia e de administração de empresas. À exceção de Bo Carlsson, todos eles são nascidos e publicam seus trabalhos na Europa (Suécia, Suíça, Holanda, Dinamarca, Holanda e Inglaterra).

As inovações tecnológicas são tratadas no portfólio sob diferentes conceitos, elencados na Figura 2.

Figura 2 – Inovação tecnológica

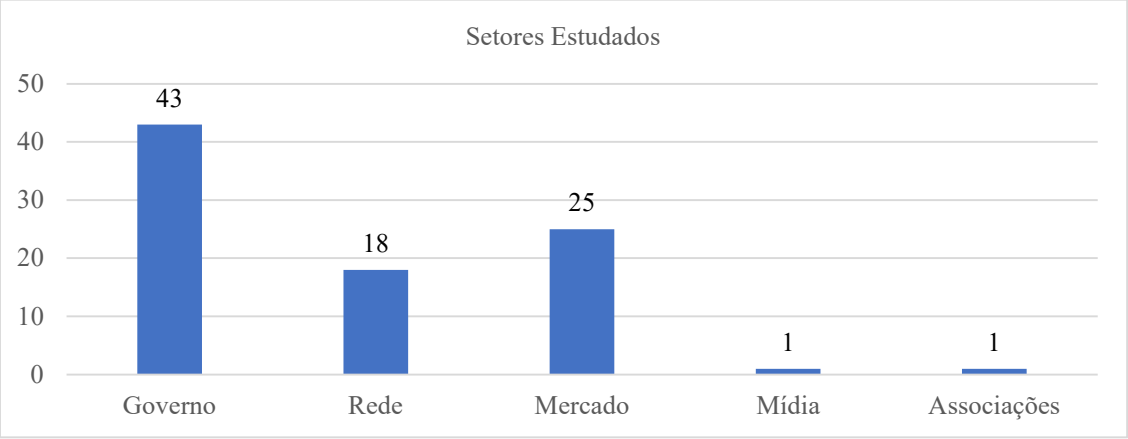


Fonte: Autoria própria (2023).

Além do modelo baseado em sistemas de inovação tecnológica (SIT), presente em 18% do referencial teórico, outros termos se destacam, apresentando tendências para abordagens de inovações tecnológicas relacionadas à geração distribuída (GD) ou energia fotovoltaica (FV), os quais estão explícitos em 25% e 42% dos artigos, respectivamente. Os demais termos ou conceitos referem-se a outras fontes de energia (por exemplo, energia eólica e hídrica) e a grupos de inovações tecnológicas, como recursos energéticos renováveis (RERs) e recursos energéticos distribuídos (REDs), que surgiram a partir da evolução do uso das energias renováveis, ligadas principalmente à GD, de fontes solar e eólica.

A partir da leitura de título, palavras-chave, resumo e introdução dos artigos que compõem o portfólio, procurou-se identificar quais os setores da sociedade estão colocados no centro desses estudos. O resultado está na Figura 3.

Figura 3 – Frequência por setores da sociedade



Fonte: Autoria própria (2023).

O destaque desta análise aponta para o poder institucional dos governos como o principal setor, ou ator, quando se trata de avaliar, propor e implementar ações para o desenvolvimento tecnológico. Os artigos focados especificamente no modelo de abordagem funcional do SIT não focam em algum setor, mas apontam para a totalidade dos atores, ou para a rede de atores, ou seja, para empreendedores, formuladores de políticas, mercados e outras partes interessadas e que compõem um sistema de inovação tecnológica.

O segundo setor mais frequentemente citado nos artigos do portfólio são os mercados. O objetivo de estudo de 28% dos artigos é responder a alguma demanda mercadológica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A amostra de artigos que constitui o portfólio bibliográfico foi analisada para investigação de sua confiabilidade. Para isso, foi verificado se os artigos haviam sido publicados em periódicos de relevância, qual seu nível de citação e a credibilidade de seus autores, verificando-se, ainda, as suas principais aplicações. Assim, conclui-se que o problema proposto pela pesquisa foi integralmente respondido, com a identificação de autores e periódicos fundamentais que servirão de base científica confiável para o desenvolvimento de pesquisas futuras que envolvam o modelo de avaliação funcional relativo a sistemas de inovação tecnológica, energia solar e geração distribuída.

REFERÊNCIAS

BERGEK, Anna. *Shaping and Exploiting Technological Opportunities*: The Case of Renewable Energy Technology in Sweden. 2002. Tese (Doutorado em Tecnologia) – Department of Industrial Dynamics, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2002.

BERGEK, Anna; HEKKERT, Marko; JACOBSSON, Staffan. Functions in innovation systems: A framework for analysing energy system dynamics and identifying goals for system-building activities by entrepreneurs and policy makers. *In*: FOXON, Timothy J.; KÖHLER, Jonathan; OUGHTON, Christine (ed.). *Innovations for a Low Carbon Economy*: Economic, Institutional and Management Approaches. Cheltenham: Edward Elgar, 2008. p. 79-111.

HEKKERT, Marko P. *et al*. Functions of innovation systems: a new approach for analysing technological change. *Technological Forecasting and Social Change*, [*s. l.*], v. 74, n. 4, p. 413-432, maio 2007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002.

D'AMBROSIO, V.; LOSASSO, M.; TERSIGNI, E. Towards the Energy Transition of the Building Stock with BIPV: Innovations, Gaps and Potential Steps for a Widespread Use of Multifunctional PV Components in the Building Envelope. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12609, 15 nov. 2021.

JACOBSSON, Staffan; BERGEK, Anna. Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology. *Industrial and Corporate Change*, [*s. l.*], v. 13, n. 5, p. 815-849, 2004.

KIM, Minkyu; PARK, Chankook. Academic Topics Related to Household Energy Consumption Using the Future Sign Detection Technique. *Energies*, [*s. l.*], v. 14, n. 24, 8446, 14 dez. 2021.

MARTINS, Vanderlei Affonso; BRANCO, David Alves Castelo; HALLACK, Michelle Carvalho Metanias. Economic Effects of Micro- and Mini-Distributed Photovoltaic Generation for the Brazilian Distribution System. *Energies*, [*s. l.*], v. 15, n. 3, 737, 20 jan. 2022.

PINHEIRO, Hélio Henrique Cunha *et al*. Photovoltaic Solar Systems in Multi-Headquarter Institutions: A Technical Implementation in Northeastern Brazil. *Energies*, [*s. l.*], v. 13, n. 10, 2659, 25 maio 2020.

SENKUS, Piotr *et al*. The Potential of Ecological Distributed Energy Generation Systems, Situation, and Perspective for Poland. *Energies*, [*s. l.*], v. 14, n. 23, 7966, 29 nov. 2021.

WOHLIN, Claes. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *In*: Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. *Anais* […]. London: EASE '14, 2014.