

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA MATRIZ ENERGÉTICA ALEMÃ SOB A ÓTICA DAS FUNÇÕES DE SISTEMAS TECNOLÓGICOS DE INOVAÇÃO

**Thiago Carrano de Albuquerque Bernardes,
Universidade Federal de Santa Catarina,
thcarranober@gmail.com**

**Patrícia Andrade Paines,
Universidade Federal de Santa Catarina,
paines_sm@hotmail.com**

**Luciano Vignochi,
Universidade Federal de Santa Catarina,
lvignochi1@gmail.com**

**Osmar Possamai,
Universidade Federal de Santa Catarina,
osmarpossamai@gmail.com**

RESUMO

Para alguns pesquisadores o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica na Alemanha pode ser dividido em seis fases, tendo como marco inicial as duas crises do petróleo, pois posterior a estes acontecimentos o governo federal local deu início a uma série de programas de apoio de garantia de remuneração sobre o custo da eletricidade gerada por fontes solares de energia elétrica, que serviram de ponte para a evolução desta tecnologia naquele país. No presente artigo identificam-se os fatores-chave de sucesso da tecnologia solar fotovoltaica na Alemanha sob a ótica dos indicadores funcionais do Sistema Tecnológico de Inovação. Para isso estruturou-se uma análise de processo das seis fases de implantação desta energia com bases nas políticas públicas e os atores envolvidos neste sistema tecnológico. Esta análise mostrou que em durante as fases iniciais de evolução do sistema, o progresso funcional foi impulsionado principalmente pela orientação da função desenvolvimento de conhecimento, sugerindo a existência de um alinhamento na introdução da energia solar fotovoltaica com os acontecimentos econômicos e políticos marcantes nas décadas de 1970 a 1990, como as já citadas duas crises do petróleo, o acidente nuclear de Chernobyl e conferencia das Nações Unidas sobre meio ambiente e desenvolvimento no Rio de Janeiro em 1992. Acontecimentos esses de repercussão direta nos recursos energéticos mundiais e conseqüentemente promoveram uma situação favorável à construção do sistema tecnológico desta inovação no país em parceria com instituições nacionais e internacionais.

Palavras-chave: Energia Solar fotovoltaica; Sistemas Tecnológicos de Inovação; Indicadores de Inovação.

1 INTRODUÇÃO

A energia solar fotovoltaica pode ser caracterizada como uma fonte não poluente por utilizar o princípio de funcionamento baseado na conversão direta de energia solar em energia elétrica pelos efeitos da radiação sobre determinados materiais eletro-eletrônicos, em particular os semicondutores. Entre esses efeitos da radiação, destacam-se o termoelétrico e o fotovoltaico, sendo o primeiro caracterizado pelo surgimento de uma diferença de potencial, provocada nos terminais dos semicondutores, em condições específicas e no segundo, os fótons contidos na luz solar são convertidos, por estes materiais em corrente elétrica (MESSENGER; ABTAHI, 2016). Desta forma permitindo o uso desta fonte, nos mais diversos locais, exigindo apenas a presença da luz solar.

Apesar dos benefícios sociais, ambientais e de saúde relacionados com esta tecnologia energética, a sua difusão mundial não tem sido um grande sucesso. Segundo EPIA (2019) a capacidade instalada de geração de energia elétrica mundial atingiu o valor 20.966,6GW e apenas 3% deste valor representa a capacidade global instalada de energia solar fotovoltaica.

Neste contexto, a Alemanha acumulou 49,2 GW instalados em sua matriz energética fotovoltaica, dando-lhe a quarta posição entre os países com maior capacidade instalada, atrás da China (204,7 GW), EUA (75,9GW) e Japão (63 GW).

Porém ao se analisar a potência instalada por habitante no país, averigua-se um recorde mundial de 595 Watts/pessoa e em média por ano a região tem a capacidade de suprir 20% da sua demanda de energia elétrica através da produção solar fotovoltaica (LOUWEN; VAN SARK, 2020). Além disso, esta nação conseguiu o feito de ultrapassar o número de 1,4 milhões de sistemas fotovoltaicos instalados em residências para cerca de 8,5 milhões de habitantes, ou seja, 10,54% da população vivem em casas que incorporam sistemas solares para produzirem sua própria eletricidade (RUF, 2018). Resultados esses frutos de políticas, pesquisas, investimentos e incentivos financeiros para promover essa e outras fontes de energia renováveis há alguns anos realizados pelo país (KRIECHBAUM *et al.* 2018).

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo identificar os eventos-chave de sucesso da tecnologia solar fotovoltaica na Alemanha sob a ótica dos indicadores do Sistema Tecnológico de Inovação (STI) por intermédio da metodologia de análise de processos. Para atingir tal objetivo, busca-se responder a seguinte pergunta de pesquisa:

Q1 - Quais são os eventos-chave do sucesso do desenvolvimento e da difusão da energia solar fotovoltaica alemã e suas respectivas funções correspondentes no STI?

Q2 – Quais destas funções apresentam maior notoriedade em cada fase da evolução funcional do STI em questão?

Quanto à classificação científica do presente trabalho, o mesmo pode ser classificado como de natureza teórico conceitual e apresenta características de caráter exploratório, no sentido que se propõe a formular questões para trazer maior familiaridade com o tema, tornando-o mais explícito e proporcionando condições para encontrar respostas para outros problemas de pesquisa que venham a surgir sobre o tema, conforme Gil (2010). Do ponto de vista dos procedimentos técnicos utilizados, é classificado como bibliográfico, por ter seu desenvolvimento baseado em material já elaborado, no caso sendo relatórios governamentais, empresariais, artigos científicos e livros. Já a abordagem dada ao problema é qualitativa na estruturação e no tratamento do problema em si, conforme estabelece a literatura (e.g., GIL, 2010; MARCONI; LAKATOS, 2010).

Ademais, o trabalho está organizado em cinco seções, onde na segunda seção, a explicita-se a abordagem teórica de análise dos indicadores do STI. Na terceira seção, serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para identificar os eventos-chave e analisar esses indicadores. Na quarta seção, analisam-se as fases de evolução do STI da energia solar fotovoltaica alemã a partir dos eventos-chave e seus respectivos indicadores encontrados. E por último na quinta seção encerra-se o trabalho com algumas conclusões e *insights* de possibilidades futuras de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

Algumas vezes, inovações tecnológicas são introduzidas para substituir as alternativas existentes, para as quais experiências do usuário foram acumuladas, preferências culturais e rotinas são alinhadas (HIPPEL, 1986; BELL, 2009). Em contraste, as novas tecnologias são caracterizadas pelo alto custo, informações limitadas sobre seus benefícios e falta de capacidade dos potenciais usuários de operar (ROGERS, 1995). Isto também significa que a competência adotante, ou o que Cohen e Levinthal (1990) denomina como capacidade de absorção, é uma determinante crítica da difusão e adoção de novas tecnologias. Para uma difusão e adoção ocorrer, o desenvolvimento das capacidades tecnológicas é de fundamental importância (OCKWELL, 2008).

Para fornecer a base conceitual do desenvolvimento tecnológico, modelos teóricos

heurísticos têm recentemente sido desenvolvidos com a abordagem de Sistema de Inovação (SI) de Herkkert *et al.*, 2007. Segundo Freeman (1987) um SI pode ser definido como uma rede de instituições nos setores públicos e privados, cujas atividades e interações iniciam, importam e difundem novas tecnologias.

Na literatura, vários tipos de SI são identificados, cada um relacionado com a definição de fronteira do sistema considerado. Por exemplo, um Sistema Nacional de Inovação (SNI) leva os estados-nações ao limite natural de um SI (LUNDVALL *et al.*, 2002). Isto implica que o SI compreenda todos os atores e instituições sociais em um país envolvido em processos de inovação de diferentes tecnologias.

No entanto, quando a finalidade é analisar os processos de inovação em torno de uma determinada tecnologia, um Sistema Tecnológico de Inovação (STI) específico é ferramenta preferida. Negro *et al.* (2008) observou que o conceito de STI incide apenas sobre os elementos estruturais que influenciam diretamente o desenvolvimento e difusão de uma tecnologia específica. Um STI pode ainda ser definido como um conjunto de redes de agentes que interagem numa especificada área econômico/industrial sob uma infraestrutura institucional em particular ou um conjunto de infraestruturas e envolvidas na geração, difusão, e a utilização de tecnologia (CARLSSON; STANKIEWICZ, 1991).

Os componentes estruturais de um STI são atores, redes e instituições. Os atores são agentes envolvidos como desenvolvedores, promotores, financiadores, fornecedores e usuários da tecnologia. Eles podem ser governamentais, não-governamentais, de mercado ou não mercantil, organizações, grupos e indivíduos. As redes são relacionamentos entre os atores. Elas se referem à comunicação, normativa e as interações financeiras nas quais o conhecimento e as informações relativas à tecnologia são transmitidos a partir de um agente para o outro. As instituições são as regras que regulam a ação e interação dos atores do sistema (JACOBSSON; BERGEK, 2004).

O desenvolvimento teórico do quadro SI tem sido a alegação de que um STI executa atividades chave e processos que contribui para o objetivo primário do SI, ou seja, desenvolvimento, difusão e adoção de tecnologias. Estas atividades e processos têm sido chamados funções do STI (HEKKERT *et al.*, 2007; JACOBSSON; BERGEK, 2004). Uma vez que o conceito é desenvolvido, várias listas de funções são identificadas e Hekkert *et al.* (2007), Negro *et al.* (2007), Bergek *et al.* (2008) e Suurs e Hekkert (2008) fornecem uma análise das funções na literatura. O **Quadro 1** mostra estas funções com suas respectivas

definições baseadas em Hekkert *et al.* (2007).

Quadro 1: Funções dos Sistemas Tecnológico de Inovação

Funções	Definições
Atividades empreendedoras	Envolve a entrada de atividades empresariais de experimentação em torno de uma nova tecnologia.
Desenvolvimento do conhecimento	Representa aprendizagem tecnológica, como atividades de pesquisa sobre a situação sócio-econômica local, capacidades, questões técnicas e de mercado da tecnológico.
Difusão do conhecimento	Capta a presença de conhecimento e partilha de canais ou redes entre os principais intervenientes, tais como parcerias, <i>workshops</i> e extensão de serviços.
Orientação da pesquisa	Representa orientação aos atores para mobilizar recursos sinalizando oportunidades e prevendo expectativas positivas.
Formação de mercado	Representa a criação de espaços de mercado protegidos que facilitam o desenvolvimento do mercado para uma nova tecnologia desde que a nova tecnologia tenha um valor elevado em comparação com as alternativas existentes.
Mobilização de recursos	Representa recursos voltados para a promoção de desenvolvimento, difusão e uso de novas tecnologias.
Criação de legitimidade	Capta os esforços legais de sensibilização dos atores sobre uma nova tecnologia

Fonte: Hekkert *et al.* (2007)

Embora as análises de Hekkert *et al.* (2007), Negro *et al.* (2007), Bergek *et al.* (2008) e Suurs e Hekkert (2008) considere, entrada de atores, formação de redes e surgimento de instituições, seu foco principal é na captura dos acontecimentos no sistema como um todo. Logo, o mapeamento do desenvolvimento e interação das funções, analisando o seu impacto sobre a função global do STI é resultado final destas análises e por este motivo Hekkert *et al.* (2007) propôs esta classificação exposta no **Quadro 1**.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para identificação das principais atividades e processos históricos relacionadas com atores, redes e instituições, ou seja, as funções do STI são mapeadas como eventos e a metodologia utilizada para realizar esta atividade é a **análise de processos** (VAN DE VEN; HUBER, 1990). Nessa abordagem qualitativa, a sequência dos eventos que vão se desenrolando ao longo do tempo são elementos centrais que explicam os resultados obtidos (ABBOTT, 1990; LANGLEY, 1990). Para isso, foram analisados eventos relacionados com o desenvolvimento e a promoção da energia solar fotovoltaica na Alemanha utilizando a estratégia de revisar dados secundários tais como documentos governamentais, relatórios de institutos de pesquisa e empresas do ramo, artigos científicos e livros.

Sabendo-se ainda, que coleta de todos os eventos relacionados a esse processo de desenvolvimento e difusão no país é uma tarefa impossível. Isto porque nem todas essas as atividades foram documentadas. A tentativa de coletar o máximo de eventos-chave que podem ter influenciado no processo de criação e expansão da tecnológica na região é válido para metodologia, pois elaborar-se uma narrativa com uma maior riqueza de detalhes possíveis e consequentemente os eventos encontrados explicaram muitos dos motivos do sucesso do STI da energia solar fotovoltaica na Alemanha (VAN DE VEN; HUBER, 1990).

Posteriormente a coleta dos eventos-chave através de dados secundários, foi identificado cada um desses acontecimentos relacionadas ao processo de difusão e desenvolvimento tecnológico e classificados conforme os indicadores funcionais do STI propostos por Herkkert *et al.* (2007) e expostos no **Quadro 2**.

Quadro 2: Indicadores para as funções dos Sistemas Tecnológicos de Inovação

Funções	Atividades indicadoras das funções do STI
Atividades empreendedoras	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia de fabricação e/ou instalação, construção; • Entrada de empresas/produtores.
Desenvolvimento do conhecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Realização de pesquisas de mercado/viabilidade; • Desenvolvimento de materiais promocionais; • Desenvolvimento de novos designs/ protótipos; • Testes de desempenho do modelo; • Adaptação ou modificação do modelo; • Desenvolvimento de tecnologias complementares;

	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação de tendências de uso de energia solar fotovoltaica; • Avaliar a disponibilidade de matérias-primas para produção da tecnologia; • Realização de avaliações de impacto.
Difusão do conhecimento	<ul style="list-style-type: none"> • Formação (de engenheiros, técnicos e construtores); • Realização de campanhas de sensibilização; • Organização de conferências/ workshops/ seminários/ reuniões; • Demonstrações de exposições.
Orientação da pesquisa	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecimento de metas; • Desenvolvimento de regulamentos e políticas favoráveis; • Premiações; • Divulgação dos resultados das pesquisas.
Formação de mercado	<ul style="list-style-type: none"> • Compartilhamento dos custos do investimento (Subsídios); • Tecnologia de fabricação e/ou instalação, construção; • Definir incentivos fiscais; • Reforma regulatória.
Mobilização de recursos	<ul style="list-style-type: none"> • Fornecimento de incentivos financeiros, subvenções (<i>funding</i>); • Proporcionar empréstimos (crédito); • Mobilização de recursos humanos, tais como a contratação de consultores e pessoal técnico; • Fornecimento de ferramentas (equipamentos).
Criação de legitimidade	<ul style="list-style-type: none"> • Atividades de condução legal (<i>lobbying</i>).

Fonte: Herkkert *et al.* (2007)

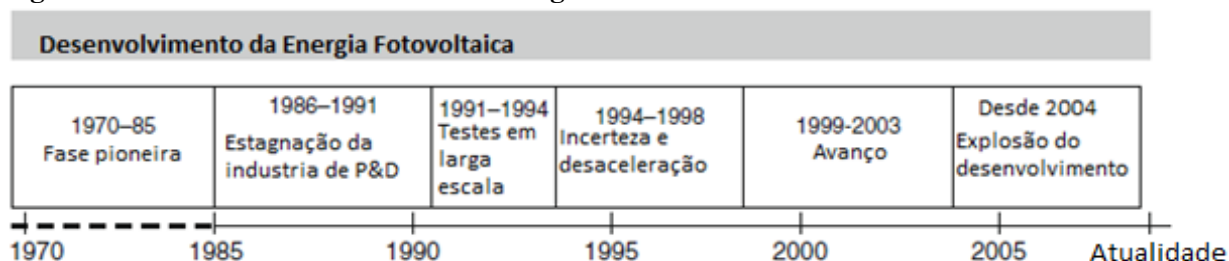
Após a identificação e classificação de cada evento-chave em relação às funções, foi possível compreender a narrativa que descreve o desenvolvimento do STI da energia solar fotovoltaica na Alemanha e as interações entre essas funções que levaram aos resultados da difusão bem sucedida desta tecnologia naquela região.

4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Esta seção descreve a evolução do STI para a tecnologia solar fotovoltaica na Alemanha. Desta forma, fornecerá a visão geral da evolução funcional com base na descrição

de seis episódios, segundo Burns (2011) que apontaram as mudanças nos padrões funcionais desta tecnologia, conforme **Figura 1**.

Figura 1: Fases de desenvolvimento da energia solar fotovoltaica na Alemanha



Fonte: Burns (2011)

Os marcos iniciais no desenvolvimento da energia fotovoltaica na Alemanha durante a fase pioneira (1970-1985) foram às duas crises petrolíferas de 1973 e 1979, desencadeadas por conflitos no oriente médium, aliado a um desejo de reduzir a dependência de matérias-primas importadas, a consciência dos limites das reservas de combustíveis fósseis, os impactos ambientais de fontes de energias fósseis e uma falta de aceitação para energia nuclear pela comunidade europeia em geral (BURNS, 2011).

Entre 1975 e 1985, o Ministério de Pesquisa e Desenvolvimento alemão atribuiu um total de 160 milhões projetos de pesquisa e desenvolvimento de energias renováveis (LUNDSZIEN, 1997). Um desses projetos era o programa para energia solar *Technologien zur Nutzung der Sonnenenergie*, lançado pelo governo federal alemão entre 1977 a 1980. O Programa de Pesquisa era focado no desenvolvimento de novos materiais e processos de produção de baixo custo, bem como a compilação e avaliação dados meteorológicos e técnicas correspondentes (RÄUBER, 2005).

Os atores importantes nesta fase pioneira foram aqueles que promoveram a investigação sobre geração de energia usando a tecnologia solar fotovoltaica. Além do Ministério de Pesquisa e Desenvolvimento, que forneceu os fundos, estes atores incluíam empresas, tais como a AEG e a *Siemens*, universidades e o Instituto de Pesquisa para Sistemas de Energia Solar, o *Fraunhofer* (ISE) (ISE, 2014).

Entre 1975 e 1985, as primeiras pesquisas sobre células fotovoltaicas feitas com a participação das indústrias foram atribuídas, a ARCO e AEG-Telefunken e mais tarde também a *Siemens* e a sua subsidiária, *Interatom* (RÄUBER, 2005).

Em 1975 a empresa *Freiberger Elektronikwerkstoffe* começou a produção de células solares de película fina com base em seleneto de cobre índio (CIS), que alcançaram a

eficiência superior a 12% em condições de laboratório e três anos mais tarde trabalhando em conjunto com a AEG-*Telefunken* e ARCO desenvolveram a primeira célula solar de silício policristalino, sendo está mais barata que as de silício monocristalino e com uma eficiência de 13% (WAGEMANN; ESCHRICH, 2004; RÄUBER, 2005).

No mesmo ano surgem mais três tecnologias de películas finas com potencial de ser produzido em escala industrial (silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) seleneto de cobre índio (CIS)) (WAGEMANN; ESCHRICH, 2004). Neste ponto, pesquisadores também já havia desenvolvido o princípio de construção para os sistemas fotovoltaicos em módulos, que ainda é predominantemente até hoje (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2020). Desde então, as atividades para promover o desenvolvimento de tecnologias para a produção de energia solar fotovoltaica têm-se centrado nas seguintes áreas: melhoria das células solares de silício mono ou policristalino de película fina, melhoria dos inversores e desenvolvimento de tecnologia de produção em escala industrial (RÄUBER, 2005).

Em 1979, a subsidiária da concessionária de energia RWE, NUKEM, começou trabalhar para permitir a produção em escala industrial de células solares de película fina à base de telureto de cádmio (CdTe). No ano seguinte, a empresa MBB lançou um projeto de pesquisa para a produção de película fina solar a partir de células de silício amorfo (a-Si). As empresas *Mobil Solar* e AEG conduziram semelhantes atividades de investigação (RÄUBER, 2005).

Dois anos mais tarde, inicia-se o Segundo Programa Pesquisas Energéticas (1981-1989) focado em minimizar os custos de produção de células solares de película fina, desenvolver pesquisas de novos materiais com melhores taxas de eficiência e cortar os custos dos procedimentos de produção e fabricação de silício (RÄUBER, 2005).

Em 1985, o Ministério de Pesquisa e Desenvolvimento alemão lançou um programa teste para avaliar a aplicação de energia fotovoltaica em sensores descentralizados como: bóias marítimas, lâmpadas de rua e sinais. Este programa foi realizado em conjunto com a cooperação do Instituto de Sistemas de Energia Solar *Fraunhofer* (ISE) e possuiu um período de monitoramento de dois anos. Estas experiências ampliaram o escopo de sistemas fotovoltaicos, que tinha primariamente sido utilizado em aplicações em pequena escala até aquele ponto (RÄUBER, 2005).

Por outro lado, as empresas alemãs geradoras de energia elétrica nesta fase também expressaram certo nível de interesse em aplicar tecnologia solar fotovoltaica em larga escala,

a partir do momento que o *Technologien zur Nutzung der Sonnenenergie* atingiu certa maturidade (RÄUBER, 2005). A exemplo disso, empresa concessionária de energia elétrica, RWE, iniciou a operadora da usina de energia fotovoltaica na ilha de Pellworm em 1983, usina está sendo a primeira usina fotovoltaica da Alemanha. Era uma planta piloto, utilizando células fabricadas pela AEG. A usina foi integralmente financiada com recursos do Ministério de Pesquisa, na época foi a maior usina fotovoltaica na Europa com uma potência de 300 kW (JACOBSSON *et al.*, 2002).

Devido ao baixo número de unidades e baixos índices de eficiência (aproximadamente de 13%), o custo de produção células fotovoltaicas foi extremamente elevado durante esta fase pioneira. Foi apenas economicamente viável para usar essa tecnologia para gerar eletricidade em nichos específicos (e.g. Usina de Pellworm) e para aplicativos isolados que anteriormente eram principalmente movidos a bateria (e.g. bóias, dispositivos de telecomunicações ou relógios de pulso) (RÄUBER, 2005).

A segunda fase do processo de desenvolvimento e difusão da tecnologia solar fotovoltaica, conhecida com estagnação da indústria P&D (1986-1991), teve como ponto de partida o desastre do reator em Chernobyl. As consequências ecológicas e os riscos para a indústria de energia tornaram-se um tema de debate público que os decisores políticos da área de energia não podia mais ignorar. Os atores envolvidos na promoção das fontes renováveis poderiam ver um mar mudança na política energética emergir no horizonte (BURNS, 2011).

Em 1988, a Comissão Europeia manifestou a sua oposição as estruturas monopolistas existentes e de direitos exclusivos no mercado da eletricidade. Isto levou o Governo Federal alemão a alterar o Regulamento Federal de Eletricidade Tarifário. Os esforços simultâneos de liberalização do mercado e proteção do meio ambiente resultaram em um contexto, que foi extremamente favorável para o desenvolvimento de energias renováveis na Alemanha, permitindo a continuação do financiamento de programas de pesquisa na área, em particular para pesquisas com células de película fina (WAGEMANN; ESCHRICH, 2004).

No geral, não houve grandes avanços na tecnologia durante esta segunda fase, os sistemas solares fotovoltaicos a partir deste período estavam ainda propensos a sofrer de falhas operacionais devido a inversores com defeito ou outros defeitos elétricos que seriam corrigidos partir dos aprimoramentos tecnológicos advindos nos anos seguintes (BURNS, 2011).

A terceira fase conhecida como testes em larga escala (1992-1993) é marcada pelo

debate sobre proteção climática internacional e o princípio da orientação do desenvolvimento sustentável, que foi ganhando importância no cenário mundial.

Em 1990 é lançado o Programa 1.000 Telhados, que foi projetado para gerar uma dinâmica de tecnologia fotovoltaica, além de ser uma tentativa de mostrar que a política financiamentos de sistemas de energia fotovoltaica descentralizados não gerariam problemas na distribuição de energia (JACOBSSON *et al.*, 2002). O Ministério de Pesquisa e Desenvolvimento iniciou o programa e o financiamento ficou a cargo do Governo Federal e os estados responsáveis pelo subsídios de até 70% dos custos de investimento. Foi a primeira tentativa de introduzir a energia fotovoltaica aos consumidores residenciais. Como resultado de o alto nível de interesse e a posterior incorporação da Alemanha Oriental, o programa foi estendido para financiar um total de 2.250 instalações (IEA, 1999).

O programa consedeu financiamento para conectar à rede de energia elétrica, sistemas fotovoltaicos com uma capacidade instalada entre 1 á 5 kW. A capacidade total dos sistemas subsidiados atingiu cerca de 4 MW (REICHE, 2004). O último sistema a receber financiamento no âmbito deste programa foi instalado no final de 1995. Na época, o Programa 1.000 Telhados era o mais extenso programa de apoio e financiamento para sistemas fotovoltaicos e foi visto em nível internacional como altamente inovador (JACOBSSON *et al.*, 2002). Isto resultou no desenvolvimento de novos inversores de energia e a melhoria do condições técnicas para a instalação fotovoltaica e a integração na rede de energia elétrica (REICHE, 2004).

Em 1992, as Nações Unidas declararam seu compromisso com o desenvolvimento sustentável e adotaram uma programa de ação global, a Agenda 21, na Conferência sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente no Rio de Janeiro, a ECO-92. Foi o primeiro tratado internacional que obrigou um grupo de 15 países a tomar medidas em particular para cortar emissões dióxido de carbono. Neste momento, a Alemanha reunificada revê seus objetivos referente as suas políticas energéticas, após sua assinatura neste documento (BURNS, 2011).

Em 1994, o setor de energia solar fotovoltaica global experimentava um crescimento acelerado, o desenvolvimento desta tecnologia na Alemanha estava passando por uma fase crítica conhecida como a fase da incerteza e descentralização (1994-1998). O setor espera que a nova coalizão do Governo Federal que chegou ao poder após as eleições daquele ano e iria trabalhar para continuar os programas já iniciados, porém os políticos alemães adotaram uma abordagem mais reservada quando comparado a fase anterior.

Em 1997, o novo Ministro de Pesquisa e Desenvolvimento Jürgen Rüttgers rejeitou o conceito de energia fotovoltaica subsidiada e a proposta para o Programa de 100.000 Telhados (REICHE, 2004). Rüttgers manifestou a sua oposição ao financiamento de sistemas fotovoltaicos conectados a rede de energia elétrica e apresentou propostas para financiar instalações de sistemas isolados a rede (WAGEMANN; ESCHRICH, 2004). Após o Programa de 1.000 Telhados ter chegado ao fim em 1994 na Alemanha Ocidental e em 1995 na Alemanha Oriental, não houve seguimento adequado no projeto de apoio ao desenvolvimento da energia solar (JACOBSSON *et al.*, 2002).

O setor da energia solar fotovoltaica criticou a falta de um apoio eficaz no mercado que lhes concedessem uma chance de enfrentar a concorrência dos EUA. Na época, um em cada cinco sistemas solares fotovoltaicos fabricados nos EUA, um era exportado para a Alemanha. Como resultado da situação difícil, jovens empresas na Alemanha tiveram problemas ganhar posição no mercado (REICHE, 2004).

Durante esta quarta fase, o Governo Federal não forneceu financiamento para projetos de energia solar fotovoltaica no país. Como resultado, a indústria fotovoltaica alemã retraiu (BURNS, 2011). No entanto, o setor recebeu um apoio financeiro das receitas de juros atribuídos pelo Ministério do Meio Ambiente, que foram gerados pelos leilões de energia, permitindo com que a Alemanha continuasse seu apoio à tecnologia (RÄUBER, 2005).

Em 1998 a Alemanha vive novamente uma mudança de governo, quando os resultados eleitorais deram a vitória ao Partido Social-Democrata no Parlamento Federal, surgiu uma esperança no setor da energia solar fotovoltaica. A re-orientação da política energética do novo governo teve um efeito significativamente positivo sobre esta fonte de energia, tendo em vista que o Programa 100.000 Telhados teria sua continuidade, fato este consolidado através de um acordo da coligação vencedora da eleição. Durante as negociações de coalizão iniciou uma aliança de grupo conhecidos como "os parlamentares solares", onde cerca de 50 membros do parlamento fizeram parte deste grupo (REICHE, 2004).

No mesmo ano, várias organizações começaram a fazer campanha para um programa de apoio que cria-se um mercado de massa para sistemas de energia solar fotovoltaico. Duas associações que foram particularmente bastante ativas neste campo de *lobbying* foram EUROSOLAR e a Associação Federal da Indústria Solar (JACOBSSON *et al.*, 2002). As campanhas de *lobby* organizado por estas organizações se resumiam a reunir as empresas tradicionais no fornecimento de energia elétrica e convencê-las a investir no mercado.

Em 1999 inicia-se a quinta fase do desenvolvimento e difusão da energia solar fotovoltaica alemã, conhecida como fase do avanço (1999-2003), o Programa de 100.000 Telhados foi seu marco inicial, concedido através do Governo Federal alemão para a construção e ampliação de sistemas fotovoltaicos com capacidade instalada a partir de 1 kW e contemplou um total de 55.000 sistemas com uma capacidade total de 346 MW recebendo um apoio através de empréstimos no valor total de 2,3 bilhões de euros (WAGEMANN; ESCHRICH, 2004). A possível participação do financiamento era de até 100% do projeto sendo este limitado ao valor de 500.000 euros e abrangia a compra de inversores, aparelhos de medição, placas solares, custos de instalação e os custos de planejamento.

Em 2001, é aprovado no parlamento a nova Lei de Geração de Energia Elétrica EEG (*Erneuerbare Energien Gesetz*), que incluiu uma tarifa *feed-in* para energia solar de 50,6 centavos de Euro por kWh (para instalações com Potência Instalada <30 kW). O efeito combinado com Programa 100.000 Telhados significava que agora era economicamente viável para operar sistemas solares fotovoltaicos (WAGEMANN; ESCHRICH, 2004).

A alta demanda por recursos do Programa Telhados 100.000 no período seguindo a adoção do EEG. Levou a problemas de atribuição dos empréstimos, os quais se tornaram uma tarefa impossível para o governo processar o grande número de pedidos. O efeito combinado do Programa 100.000 Telhados e a elevação da tarifa *feed-in* resultou em uma inundação de 15.000 pedidos no início do ano 2003, o que levou o Ministério da Economia parar alocação empréstimos em abril daquele ano. O encerramento do Programa 100.000 Telhados criou uma incerteza entre os investidores (WAGEMANN; ESCHRICH, 2004).

Após o Programa 100.000 Telhados ter chegado ao fim em 2003, a última fase de desenvolvimento da tecnologia solar fotovoltaica alemã teve seu início, conhecida com a fase de explosão do desenvolvimento (2004-Atualidade) (BURNS, 2011). No início desta fase o setor de energia solar fotovoltaica enfrentou uma lacuna de financiamento até promulgação da Lei Provisória de Energia Fotovoltaica. Esta nova emenda entrou em vigor em 1 de Janeiro de 2004 introduzindo novas taxas de compensação para energia solar fotovoltaica, no valor de 57,4 centavos de euro por kWh gerado, sem limite mínimo de potência instalada dos equipamentos (WAGEMANN; ESCHRICH, 2004). Em contra partida, posterior a essa emenda à medida que a potência instalada de energia solar fotovoltaica no país crescia, o governo federal alemão reduzia gradativamente o subsídio dado através das tarifas de *feed-in* até o ano de 2014 com termino de sua vigência (RUF, 2018). No mesmo ano, é decretada a

Lei sobre Fontes Renováveis, a qual estabelecia a implantação de energias renováveis em pontos pré-determinados e limitados à capacidade instalada e as tarifas *feed-in*, pelo governo federal, passaram a ser reguladas pelo mercado (RUF, 2018).

Como resultado dessas ações, durante os anos de 2010, 2011 e 2012 a potência instalada evoluiu mais de 7GW por ano, um recorde mundial. Ainda neste período, a capacidade instalada no país representava quase 30% de todos os painéis fotovoltaicos implantados em todo o mundo. Em contra partida em 2013, a quantidade de novas instalações começaram a diminuir significativamente devido a políticas governamentais mais restritivas e Alemanha perdeu a sua posição de liderança como o maior produtor mundial de energia fotovoltaica para a China, em 2016, porém ainda se mantinha como país com maior potência instalada desta fonte por habitante (IEA-PVPS, 2016).

Segundo Burns (2011) nesta fase o mercado interno de células e painéis fotovoltaicos se apresenta altamente competitivo, porém se tratando num panorama internacional ainda há uma alta capacidade de expansão e surgimento de novas empresas.

No ano de 2019 o Ministério de Energia da Alemanha divulgou que espera saltar dos 31% da geração de energia através de fontes renováveis que compõe sua matriz energética para 40% até 2025 (BWE, 2019). Para isso é fundamental continuar incentivando a geração de energia solar, pois embora o país se encontre na vanguarda desta tecnologia, ainda há um potencial evolutivo muito grande (AGATHOKLEOUS; KALOGIROU, 2020).

Uma vez que os eventos-chave do desenvolvimento e difusão da tecnologia solar fotovoltaica alemã foram apresentados no texto, seguindo a metodologia de análise de processos de Van de Vem e Huber (1990), o **Quadro 3** ilustrará, de forma complementar a lista de eventos identificados e as funções correspondentes a evolução do STI de energia fotovoltaica na Alemanha segundo a classificação de Herkkert *et al.* (2007).

Quadro 3: Eventos-chave e funções correspondentes do STI de energia solar fotovoltaica na Alemanha

Ano	Eventos-chave	Função
1975	As primeiras pesquisas com células fotovoltaicas feitas pela ARCO e AEG-Telefunken.	Desenvolvimento do conhecimento
1975	<i>Freiberger Elektronikwerkstoffe</i> começou a produção de células solares de película fina com base em seleneto de cobre índio (CIS).	Desenvolvimento do conhecimento
1977	Tem início o Primeiro Programa de Pesquisa Energética, focado no	Desenvolvimento do

	desenvolvimento de novos materiais e processos de produção de baixo custo, bem como a compilação e avaliação dadas meteorológicos e técnicas correspondentes.	conhecimento
1978	A AEG-Telefunken e ARCO desenvolveram a primeira célula solar de silício policristalino.	Desenvolvimento do conhecimento
1979	A NUKEM começou a trabalhar para permitir a produção em escala industrial de células solares de película fina à base de telureto de cádmio (CdTe).	Desenvolvimento do conhecimento
1980	MBB lançou um projeto de pesquisa para a produção de película fina solar a partir de células de silício amorfo (a-Si).	Desenvolvimento do conhecimento
1981	Tem início o Segundo Programa Pesquisas Energéticas focado em minimizar os custos de produção de células solares de película fina, desenvolver pesquisas de novos materiais com melhores taxas de eficiência e cortar os custos dos procedimentos de produção e fabricação de silício.	Desenvolvimento do conhecimento
1981	Foi fundado Instituto Sistemas de Energia Solar <i>Fraunhofer</i> , sendo o primeiro instituto de pesquisa de energia solar não vinculado a universidades.	Difusão do conhecimento
1983	A empresa RWE concessionária de energia elétrica entra no mercado de energia solar fotovoltaica	Atividades empreendedoras
1983	É construída a primeira usina solar da Alemanha localizada na ilha de Pellworm.	Desenvolvimento do conhecimento
1985	O Ministério de Pesquisa e Desenvolvimento alemão lançou um programa teste para avaliar a aplicação de energia fotovoltaica em sensores descentralizados.	Desenvolvimento do conhecimento
1987	O Ministério de Pesquisa e Desenvolvimento alemão lançou o resultado do programa ampliando o escopo de experiências com sistemas fotovoltaicos de pequeno porte.	Orientação da pesquisa
1988	A Comissão Européia manifestou a sua oposição as estruturas monopolistas existentes e de direitos exclusivos no mercado da eletricidade.	Orientação da pesquisa
1990	Tem início o Programa 1.000 Telhados, que foi projetado para gerar uma dinâmica de tecnologia fotovoltaica sendo a primeira tentativa de introduzir a energia fotovoltaica aos consumidores residenciais.	Mobilização de recursos
1992	Alemanha assina o compromisso com Agenda 21 na conferencia	Criação de legitimidade

	ECO-92 das Nações Unidas	
1992	Importação de um quinto da produção norte-americana dos equipamentos de geração de energia solar fotovoltaico.	Atividades empreendedoras
1995	Divulgação o resultado de 2.250 instalações financiadas através do Programa 1.000 Telhados .	Orientação da pesquisa
1995	O setor recebeu um apoio financeiro das receitas de juros atribuídos pelo Ministério do Meio Ambiente, que foram gerados pelos leilões de licenças.	Mobilização de recursos
1997	Jürgen Rüttgers manifestou a sua oposição ao financiamento de sistemas fotovoltaicos conectados a rede de energia elétrica e apresentou propostas para financiar instalações de sistemas isolados a rede.	Orientação da pesquisa
1998	A coligação vencedora da eleição durante as negociações de coalizão iniciou uma aliança de grupo conhecidos como "os parlamentares solares".	Criação de legitimidade
1998	EUROSOLAR e a Associação Federal da Indústria Solar fazem campanha para um programa de apoio que cria-se um mercado de massa para sistemas de energia solar fotovoltaica.	Criação de legitimidade
1998	Tem início O Programa de 100.000 Telhados foi fornecido através do Governo Federal alemão para a construção e ampliação de sistemas solares fotovoltaicos com capacidade instalada a partir de 1 kW.	Mobilização de recursos
2001	Foi aprovado no parlamento a nova Lei de Geração de Energia Elétrica EEG (<i>Erneuerbare Energien Gesetz</i>) , que incluiu uma tarifa <i>feed-in</i> para energia solar de 50,6 centavos de Euro por kWh (para instalações com Potência Instalada <30 kW)	Formação de mercado
2003	Divulgação o resultado de 55.000 instalações financiadas através do Programa 100.000 Telhados .	Orientação da pesquisa
2004	Início da Lei Provisória de Energia Fotovoltaica que incluiu uma tarifa <i>feed-in</i> para energia solar de 57,4 centavos de Euro por kWh (sem limite de Potência Instalada).	Formação de mercado
2014	Início da Lei sobre Fontes Renováveis que direcionou os investimentos nas energias renováveis (incluindo a fotovoltaica) e retirou os subsídios <i>feed-in</i> por parte do governo e passou a ser	Formação de mercado

	controlado pelo valor de mercado.	
2019	O Ministério de Energia da Alemanha divulgou em 2016, que espera saltar dos 31% da geração de energia através de fontes renováveis que compõe sua matriz energética para 40% no ano 2025 e 55% no ano de 2035, através de novos investimentos em pesquisas na área.	Orientação da pesquisa

Fonte: Autor

Conforme pode ser observado pela análise do **Quadro 3** o processo de evolução STI da tecnologia solar fotovoltaica possui uma ordem de funções bem definidas para cada fase do desenvolvimento do STI, segundo Burns (2011). Já o **Quadro 4** é apresentado no intuito de ilustrar as principais funções de cada fase de desenvolvimento do STI, sendo essas funções apontadas de acordo com o impacto dos eventos-chave para cada uma dessas fases evolutivas.

Quadro 4: Principais funções do STI em cada fase de desenvolvimento e difusão da tecnologia solar fotovoltaica alemã

Período	Fase	Principais Funções
1970-1985	Fase Pioneira	Desenvolvimento de conhecimento Difusão do conhecimento Atividades empreendedoras
1986-1991	Estagnação da indústria de P&D	Orientação a pesquisa
1991-1994	Testes em larga escala	Mobilização de Recursos
1994-1998	Incerteza e descentralização	Criação de legitimidade
1999-2004	Avanço	Formação de mercado
2004-Atualidade	Explosão do desenvolvimento	Formação de mercado Orientação a pesquisa

Fonte: Autor

Após a análise do **Quadro 4** evidencia-se o papel de cada função dentro das fases de evolução do STI e a ordem cronológica de desdobramento de cada função, desde o desenvolvimento de conhecimento até a formação de mercado e uma nova orientação de pesquisa, a qual representa uma busca de novas inovações para o sustento da tecnologia no mercado, segue a descrição funcional progressiva de um STI feita por Suurs e Hekkert (2008).

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi relatado o surgimento e a evolução da tecnologia solar fotovoltaica na Alemanha com objetivo de identificar os eventos-chave deste processo de difusão tecnológica com base nos indicadores funcionais do STI e sua relação com cada fase de sua evolução funcional. Análise mostra que a evolução funcional da energia solar fotovoltaica foi impulsionada principalmente pela orientação da função desenvolvimento de conhecimento, durante as três primeiras fases de evolução do STI, sugerindo há existência de um alinhamento na introdução da energia solar fotovoltaica com os acontecimentos econômicos e políticos marcantes nas décadas de 1970 á 1990, como as duas fases da crise do Petróleo, desastre em Chernobyl e a conferencia das Nações Unidas ECO-92. Isto sugere que os fatores contextuais podem ser importantes na determinação da taxa e no padrão de acumulação funcional do STI. No entanto, para percepções conclusivas, estudos mais aprofundados devem ser desenvolvidos.

Além disso, este estudo mostra que as organizações nacionais (e.g. diversas camadas do governo, associações, instituições, universidades) têm desempenhado um papel fundamental por serem fontes de recursos para STI de países desenvolvidos, promovendo a estabilidade necessária para o seu desenvolvimento. Aparentemente, os intervenientes internacionais (e.g. redes de empresas concorrentes, associações e instituições) também possuem sua parcela de importância neste contexto. analisar a iteração entre as estruturas nacionais e internacionais e como isso contribuir para a construção do STI pode proporcionar informações úteis, sendo está uma área de interesse para futuras pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, A. A primer on sequence methods. **Organization Science**, v.1,n.4, p. 375–392, 1990.
- AGATHOKLEOUS, R A.; KALOGIROU, S. A. Status, barriers and perspectives of building integrated photovoltaic systems. **Energy**, v. 191, n.1, p. 116-121, 2020.
- BELL, M. **Innovation capabilities and directions of development**. Brighton: STEPS Centre, 2009.
- BERGEK, A.; JACOBSSON, S.; CARLSSON, S.; LINDMARK, S.; RICKNE, A. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: a scheme of analysis, **Research Policy**, v.37, p. 407–429, 2008.
- BRUNS, E. *et al.* **Innovation Conditions in the Case of Solar Power Generation. In: Renewable Energies in Germany's Electricity Market**. Springer: Netherlands, 2011.

BWE- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE. **Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland 2019**. Disponível em: <http://www.erneuerbareenergien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/zeitreihen_zur_entwicklung-der-erneuerbaren-energien_in_deutschland-1990_2019.pdf> Acesso em: 21 mai. 2020

CARLSSON, B.; STANKIEWICZ, R. On the nature, function, and composition of technological systems. **Journal of Evolutionary Economics**, v.1, n.1, p.93–118, 1991.

COHEN, W.; LEVINTHAL, D. Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation. **Administrative Science Quarterly**, v.35, n.1, p.128–152, 1990.

EPIA - EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION. **Global Market Outlook Photovoltaic's 2014-2019**, jun. 2019. Disponível em: <http://www.cleanenergybusinesscouncil.com/site/resources/files/reports/EPIA_Global_Market_Outlook_for_Photovoltaics_2014-2019_-_Medium_Res.pdf> Acesso em: 21 mai. 2020.

FREEMAN, C. **Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan**. London: Printer, 1987.

GIL, A.C. **Como Elaborar projetos de pesquisa**. 5ª edição. São Paulo: Atlas, 2010.

HEKKERT, M.; SUURS, R.; NEGRO, S.; KUHLMANN, S.; SMITS, M. Functions of innovation systems: a new approach for analyzing technological change, **Technological Forecasting Social Change**, v. 74, n.4 , p. 413–432, 2007.

HIPPEL, E. Lead users: a source of novel product concepts, **Management Science**, v.32, n.1, p.791–805, 1986.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Annual Report 1999, Implementing agreement on photovoltaic power systems**, abr. 1999. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/tr_1999.pdf> Acesso em: 21 mai. 2020.

ISE - FRAUNHOFER INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME. Electricity production from solar and wind in Germany in 2014. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/en/documents/publications/studies/Electricity_Germany_2014_CW52.pdf> Acesso em: 21 mai. 2020.

JACOBSSON, S.; BERGEK, A. Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology. **Industrial and Corporate Change**, v.13, n.5, p.815–849, 2004.

JACOBSSON, S.; SANDÉN, B.; BÅNGENS, L. Transforming the energy system—the evolution of the German technological system for solar cells. **Technology analysis & strategic management**, v. 16, n. 1, p. 3-30, 2004.

LANGLEY, A. Strategies for theorizing from process data. **Academy of Management Review**, v.24, n.4, p.691–710, 1990.

LOUWEN, A.; VAN SARK, W. Photovoltaic solar energy. IN: JUNGINGER, M. LOUWEN, A. **Technological Learning in the Transition to a Low-Carbon Energy System**, 1 ed. Amsterdã: Elsevier, 2020. P.65-86.

LUNDSZIEN, D. **Die Geschichte der Photovoltaik**. Munich: Photon, p. 36–39, 1997.

LUNDVALL, B.; JOHNSON, B.; ANDERSEN, E.; DALUM, B. National systems of production, innovation and competence building. **Research Policy**, v.31, n.2, p.213–231, 2002.

KRIECHBAUM, M.; PROL, J. L.; POSCH, A. Looking back at the future: Dynamics of collective expectations about photovoltaic technology in Germany & Spain. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 129, n.1, p. 76-87, 2018.

MARCONI, M. D. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos da Metodologia Científica**. 7ª Edição. São Paulo: Atlas, 2010.

MESSENGER, R. A.; ABTAHI, A. **Photovoltaic Systems Engineering**. Boca Raton: CRC press, 2017.

NEGRO, S.; HEKKERT, M.; SMITS, R. Explaining the failure of the Dutch innovation system for biomass digestion—a functional analysis. **Energy Policy**, v.35, n.2, p.925–938, 2007.

_____. Stimulating renewable energy technologies by innovation policy. **Science Public Policy**, v.35, n. 3, p. 403–416, 2008.

NEGRO, S.; SUURS, R.; HEKKERT, M. The bumpy road of biomass gasification on in the Netherlands: explaining the rise and fall of an emerging innovation system, **Technological Forecast Social Change**, v.75, n.1, p.57-77, 2008.

OCKWELL, D.; WATSON, J.; MACKERRON, G.; PAL, P.; YAMIN, F. Key policy considerations for facilitating low carbon technology transfer to developing countries. **Energy Policy**, v.36, n.11, p.4104–4115, 2008.

RÄUBER, A. **Photovoltaik in Deutschland – eine wechselvolle Geschichte. Auf dem Weg in die solare Zukunft**. Beerse: Janseen v. 30, n.1, p. 151–170, 2005.

REICHE, D. **Rahmenbedingungen für erneuerbare Energien in Deutschland. Möglichkeiten und Grenzen einer Vorreiterpolitik**. Frankfurt: Wien, 2004.

ROGERS, E. **Diffusion of Innovations**. New York: Free Press, 1995.

RUF, H. Limitations for the feed-in power of residential photovoltaic systems in Germany—An overview of the regulatory framework. **Solar Energy**, v. 159, n.1 , p. 588-600, 2018

SUURS, R.; HEKKERT, M. Cumulative causation in the formation of a technological innovation system: the case of biofuels in the Netherlands. **Technological Forecasting and Social Change**, v.76, n.8, p.1003–1020, 2008.

VAN DE VEN, A. H.; HUBER, G. P. Longitudinal field research methods for studying processes of organizational change, **Organization Science**, v.1, n.3 , p. 213–219, 1990.

WAGEMANN, H. G.; ESCHRICH, H. **Photovoltaik**. Wiesbaden: Vieweg+ Teubner, 2010.