



A pervasividade industrial multidimensional das novas tecnologias habilitadoras

Vanessa de Lima Avanci¹

Ana Urraca-Ruiz²

Resumo

Quanto mais ampla e variada a aplicação de uma tecnologia na indústria, sobre vários produtos e/ou processos, em diferentes combinações com outras tecnologias e em diversos setores, maior deverá ser o seu grau de pervasividade. Dados os vínculos de conhecimento entre indústrias e tecnologias que podem ser representadas mediante redes de conhecimento, este artigo tem como objetivo propor indicadores de pervasividade industrial. Os indicadores propostos serão aplicados a um conjunto de novas tecnologias habilitadoras, isto é, tecnologias que se encontram em expansão na indústria e que contam com um elevado potencial de aplicabilidade. Os indicadores de pervasividade deverão revelar o padrão de relações formadas pelas novas tecnologias habilitadoras na base de conhecimento de cada indústria de transformação. Uma vez gerados indicadores de pervasividade no nível intraindustrial utilizando as ferramentas de análise de redes, será gerado um índice composto de pervasividade interindustrial. Busca-se com isso contribuir para a mensuração do potencial dessas novas tecnologias habilitadoras para a diversificação das relações que formam a base de conhecimento tecnológico da indústria.

Palavras-chave: Tecnologia, índices fuzzy, pervasividade, base de conhecimento, redes.

Área ABEIN: 5.7 Inovação, competências e competitividade

JEL: O30

Abstract

The broader and more varied the application of a technology in the industry, over several products and/or processes, in different combinations with other technologies and in several sectors, the greater should be its degree of pervasiveness. Given the knowledge links between industries and technologies that can be represented through knowledge networks, this article aims to propose indicators of industrial pervasiveness. The proposed indicators will be applied to a set of new enabling technologies, i.e. technologies that are expanding in industry and which have a high potential for applicability. The pervasiveness indicators should reveal the pattern of relationships formed by the new enabling technologies in the knowledge base of each transformation industry. Once indicators of pervasiveness at the intra-industry level are generated using the tools of network analysis, an index composed of inter-industrial pervasiveness will be generated. It seeks to contribute to the measurement of these new enabling technologies potential for diversification of relations that form the industry's technological knowledge base.

Keywords: Technology, fuzzy index, pervasiveness, knowledge base, networks.

¹ Doutora em Economia pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Ideies/ Sistema Findes.

² Professora Associada do Departamento de Economia da Universidade Federal Fluminense (UFF).

1. Introdução

Já na década dos sessenta foi observado que o desenvolvimento de certas tecnologias baseadas na ciência (principalmente em laboratórios de P&D de grandes empresas) assim como as melhorias generalizadas nos métodos de produção baseados nas tecnologias mecânicas, de instrumentação e *softwares* eram fatores explicativos da produtividade (Rosenberg, 1963). A natureza cumulativa e complementar dessas tecnologias emergentes, utilizadas na produção de uma variedade de produtos aparentemente não relacionados, gerava melhorias descentralizadas e contínuas dos produtos e métodos de produção de diversos setores. Esta característica foi denominada 'permeabilidade' ou 'pervasividade' [do inglês *pervasiveness*].

As tecnologias pervasivas se caracterizam por possuir uma ampla variedade de novas aplicações, produtos e oportunidades de investimento em diversos setores que decorre da facilidade com que elas se combinam com outras tecnologias dado que compartilham domínios de conhecimento cujo campo de aplicação se estende a diversos produtos e mercados (Freeman *et al.*, 1982; Patel e Pavitt, 1987; Bresnahan e Trajtenberg, 1995). Além disso, trata-se de tecnologias que geram melhorias descentralizadas e contínuas em produtos e métodos de produção em diversos setores (ganhos de eficiência e flexibilização de etapas de produção).

Com caráter geral, as tecnologias pervasivas estão associadas a uma elevada oportunidade tecnológica industrial (Klevorick *et al.*, 1995). Na medida em que atendem mercados diferentes, o conhecimento incorporado em tecnologias pervasivas deverá ser complementar às bases de conhecimento de diferentes indústrias, ainda que em cada um gere relações específicas. Neste sentido, elas representam fontes de oportunidade tecnológica e de diversificação de bases de conhecimento para um amplo conjunto de indústrias, embora as trajetórias destas tecnologias em cada uma das indústrias deva ser específica e referida de forma coerente ao seu *core business* (Patel e Pavitt, 1994, 1997; Breschi *et al.*, 2003). A pervasividade de uma tecnologia é identificável em diferentes graus. Quanto maior a pervasividade, ou seja, a capacidade de uma tecnologia em se adaptar ao ambiente específico de cada indústria e se agregar à base de conhecimento previamente existente, maiores as oportunidades que oferece para se tornar uma fonte de diversificação tecnológica (Malerba e Orsenigo, 1996).

No contexto de evolução da base de conhecimento, as tecnologias pervasivas são "peças-chave" porque intermediam na formação de novas combinações entre áreas tecnológicas que possuíam poucas relações em comum, ou seja, a capacidade de integrar áreas de conhecimento diferentes que estão convergindo, como as tecnologias da informação e comunicação e as tecnologias ambientais.

Dada a importância atribuída a essas tecnologias, diversos estudos buscaram identificar tecnologias pervasivas desenvolvendo indicadores baseados em estatísticas de patentes para medir características como aplicabilidade e generalidade. Um primeiro indicador considera que uma tecnologia com múltiplos usos tende a registrar um número de ocorrências maior do que tecnologias aplicáveis a problemas mais específicos, de forma que a taxa de crescimento das ocorrências em uma área de conhecimento³ ao longo do tempo deve refletir a sua capacidade de inovação e em certa medida também o seu grau de pervasividade (Hall e Trajtenberg, 2005). No entanto, tanto a frequência quanto a taxa de crescimento das ocorrências medidas com dados de patentes não podem compor isoladamente um indicador de pervasividade porque: i) existe viés na importância relativa de determinados tipos de tecnologias e setores que possuem maior propensão para gerar patentes e ii) o ritmo de crescimento das tecnologias também depende da fase do ciclo de vida da tecnologia, o que deve ser suavizado com o uso de outras medidas na análise.

Outro motivo para a frequência de ocorrência e o ritmo de crescimento não serem suficientes para explicar o papel de uma tecnologia na construção da base de conhecimento da indústria é que não expressam a variedade de combinações realizadas. A capacidade de formar relações diferentes de duas

³ Uma área de conhecimento se refere a uma agregação das peças de conhecimento com características em comum, podendo se referir a um campo de conhecimento tecnológico ou a um determinado nível de agregação da classificação de patentes (IPC).

tecnologias que ocorrem com muita frequência na base pode ser muito distinta, visto que uma pode gerar uma variedade muito grande de combinações diferentes e, portanto, estimular o desenvolvimento em outras áreas tecnológicas, através de *spillovers*; enquanto outra tecnologia, igualmente frequente pode se tratar do desenvolvimento de uma área específica e que gera poucos *spillovers* e, portanto, com crescimento mais cumulativo.

Neste sentido, um indicador melhor para o grau de pervasividade deve refletir a múltipla aplicabilidade de uma tecnologia e a sua relação com tecnologias diferentes e que pertencem a bases de indústria diferentes, como uma medida de generalidade (Bresnahan e Trajtenberg, 1995; Hall e Trajtenberg, 2005). Com essa medida, o conhecimento agregado em uma patente é considerado pervasivo se ele é utilizado em novas patentes em conjunto com outras áreas de conhecimento distintas e/ou por depositantes que pertencem a indústrias diferentes. A concentração das patentes entre setores e áreas de conhecimento distintas também foi utilizada para medir grau de pervasividade tecnológica por indicar o potencial de aplicabilidade de uma tecnologia. Os índices de concentração utilizados para a análise da estrutura da base de conhecimento são os tradicionais *Herfindahl-Hirschman* e a Entropia de *Theil*. Uma baixa concentração indicaria uma elevada capacidade de pervasividade e um maior potencial de aplicações do conhecimento entre setores (Cecere *et al.*, 2014).

Por fim, a coerência analisa o grau de pervasividade como resultante de uma medida ponderada da generalidade dos efeitos de uma inovação (Kreuchauuff e Teichert, 2014). Este indicador atribui diferentes pesos para as combinações entre áreas de conhecimento por graus de similaridade, ou *relatedness*. O grau de *relatedness* para um par de áreas de conhecimento *ij* é tão mais alto quanto maior a sua frequência de coocorrência. Assim, a coerência é a medida do quanto uma área de conhecimento possui relações em comum com outras na base de uma indústria. As peças de conhecimento com alto grau de similaridade entre si tendem a ser aplicadas aos mesmos problemas específicos e formam conjuntos de tecnologias com muita complementaridade. As tecnologias pervasivas tendem a ter múltiplas relações, mas a sua similaridade com cada uma das demais áreas de conhecimento pode ser pequena porque ao formar muitas relações diferentes, a frequência de coocorrência com cada uma delas pode ser relativamente baixa. Ainda assim, ao considerar a soma dos pesos de cada relação da tecnologia pervasiva, sua coerência pode se tornar relativamente elevada pelo grande número de pares diferentes formados.

Considerando, portanto, a pervasividade como a capacidade de uma tecnologia de ter múltiplas aplicações em diversas indústrias, ou seja, de estar presente em todos os lugares (ubiquidade) é necessário considerar todas essas dimensões quando se compara o grau de pervasividade das tecnologias.

Dados os vínculos de conhecimento entre indústrias e tecnologias, que podem ser representadas mediante redes de conhecimento, é possível medir a pervasividade de determinadas tecnologias pelo padrão de relações formadas na base de conhecimento de cada setor. Na rede de conhecimento tecnológico, os nós centrais são peças de conhecimento que coocorrem com muitas outras e, por isso, são consideradas importantes para formação de novo conhecimento pela relativa facilidade de combinação. A aplicação da metodologia de análise de redes às bases de conhecimento de firmas permitiu observar que a distribuição das medidas de centralidade dos nós é bastante desigual, o que evidencia que algumas áreas de conhecimento são relativamente mais importantes do que outras (Saviotti, 2009).

Do ponto de vista da rede de conhecimento tecnológico, o potencial de gerar novas oportunidades não é uma medida apenas da frequência de ocorrência de uma tecnologia, mas também de sua capacidade de formar relações com uma ampla variedade de tecnologias diferentes. De maneira geral, do ponto de vista da rede de conhecimento, os determinantes do grau de pervasividade para uma tecnologia são: i) as combinações variadas com outras tecnologias, ou seja, a existência de múltiplos pares de coocorrência, e ii) uma grande variedade de combinações diferentes dessa tecnologia ocorrendo de forma dispersa entre as bases de conhecimento da indústria. Assim, um nó com variedade de relações acima da média, se comparado às demais tecnologias na rede em geral e em cada subrede industrial deve indicar uma tecnologia com elevado grau de pervasividade.

Recentemente, um conjunto de tecnologias foi definido como novas "peças-chave habilitadoras" (*key enabling technologies*) e considerado uma tendência de evolução geral para o desenvolvimento da indústria, com o potencial de criar uma variedade de novos bens e serviços, incluindo novas indústrias é formado por nanotecnologia, micro e nanoeletrônica, biotecnologia industrial, fotônica, materiais avançados e sistemas avançados de manufatura (HLEG-KETS, 2011; NSTC, 2012; UNIDO, 2013). O termo tecnologias habilitadoras (TH) é usado para se referir a este conjunto de tecnologias disruptivas⁴:

- i. *Nanotecnologia* (NANO): compreende métodos para analisar, controlar e fabricar estruturas numa escala molecular ou atômica, isto é, de um tamanho de até 100 nanômetros;
- ii. *Micro e nanoeletrônica* (MNEL): lida com tecnologias de semicondutores, materiais piezoelétricos e nanoeletrônicos;
- iii. *Biotecnologia industrial* (BIOT): tem uma definição bem ampla, mas neste estudo as aplicações tecnológicas desta área se referem àquelas com foco em enzimas, microorganismos, aminoácidos e processos de fermentação ao processo de produção;
- iv. *Fotônica* (PHOT): lida com aplicações de tecnologia ótica nas áreas de lasers, litografia, sistemas de medição ótica, microscópios, lentes, comunicação ótica, fotografia digital, LEDs e OLEDs, displays e células solares;
- v. *Materiais avançados* (AMAT): inovações em materiais incluem polímeros, compostos macromoleculares, borracha, metais, vidro, cerâmica, outros materiais não metálicos e fibras, neste estudo o foco está no campo de nanomateriais e materiais especiais para aplicações elétricas ou magnéticas;
- vi. *Manufatura avançada* (AMAN): abrange tecnologias de processo usadas para produzir qualquer uma das outras cinco tecnologias habilitadoras e também tecnologias de processo baseadas em robótica, tecnologia de automação ou fabricação integrada por computador. A tecnologia de processo inclui dispositivos de medição, controle e teste para máquinas, ferramentas de máquinas e várias áreas de tecnologia de fabricação automatizada ou baseada em tecnologia da informação.

Esse conjunto de tecnologias habilitadoras será utilizado para a aplicação da metodologia dos indicadores de pervasividade industrial proposta neste estudo a partir da análise de redes, pela possibilidade de já se observar o início de sua expansão na indústria e, portanto, de avaliar o potencial de aplicabilidade entre elas e com as demais tecnologias. Para tanto, o artigo está dividido em três seções, além desta introdução. Na segunda seção faz-se uma descrição da base de dados de patentes e da metodologia de construção da rede de conhecimento industrial. Na seção seguinte, a construção dos indicadores de pervasividade setorial com medidas de análises de redes é apresentada em três etapas: a apresentação dos indicadores de pervasividade entre indústrias para cada tecnologia; as medidas de agregação dos indicadores e o índice *fuzzy* de pervasividade, para, por fim apresentar os resultados da aplicação para o caso das tecnologias habilitadoras. Encerra-se o artigo com as considerações finais.

2. Representando a base de conhecimento industrial como uma rede

A estrutura de uma base de conhecimento pode ser representada como uma rede por possuir duas propriedades particulares: (i) estar formada por peças ou subunidades de conhecimento; e (ii) que estas são acumuladas de forma sequencial (Saviotti, 2009; Krafft *et al.*, 2011). A primeira propriedade indica que a base de conhecimento pode ser concebida como uma rede composta de nós (as peças de conhecimento) e de arestas (as ligações entre duas ou mais peças de conhecimento quando utilizadas em conjunto). A segunda propriedade estabelece que um estoque de conhecimento expressa a dimensão dos relacionamentos (*relatedness*) entre nós e que a recombinação destes representa a evolução do progresso técnico (Saviotti, 2009; Nesta e Saviotti, 2005, Krafft *et al.*, 2011).

⁴ Definição baseada em EC (2009a,b) e EC(2014) e no Key Enabling Technologies (KETs) Observatory Methodology Report provida pela European Commission.

Uma base de conhecimento pode ser construída a partir de bases de patentes. Uma patente representa uma tecnologia na forma de um novo artefato, método ou processo. Cada patente tem atribuídos um ou vários domínios tecnológicos, similares ou dissimilares, que representam as funcionalidades interconectadas (subtecnologias). Esses domínios tecnológicos são códigos IPC (*International Patent Classification*) que estão referidos a funcionalidades (áreas de conhecimento tecnológico) vinculadas com disciplinas do conhecimento científico (por exemplo: materiais flexíveis).

Os dados de patentes permitem identificar dois tipos de informação: as ocorrências e as coocorrências. A frequência das ocorrências conta o número de vezes que uma determinada IPC aparece no conjunto de patentes. Esta medida permite representar os nós da rede. A frequência das coocorrências conta o número de vezes que uma IPC i ocorre junto com uma IPC j em diferentes patentes. Esta medida permite quantificar o número de ligações ou arestas entre IPCs. A rede assim construída se representa matematicamente mediante uma matriz de inter-relações.

A matriz de inter-relações é quadrada, simétrica e não direcionada quando se utilizam coocorrências [seria direcionada quando se utilizam citações de patentes]. A matriz representa na diagonal a contagem ou frequência das ocorrências (ou o número de vezes que uma IPC ocorre em solitário ou com a mesma IPC para um nível de desagregação maior). O resto das células representa a frequência das coocorrências, isto é, o número de vezes que o IPC i ocorre com o IPC j na mesma tecnologia (patente). Para cada indústria, a matriz de inter-relações é dada por:

	IPC ₁	IPC ₂	.....	IPC _n	Total Ocorrências Isoladas	Total Coocorrências	Total Patentes
IPC ₁	o_{11}	c_{12}	.....	c_{1n}	o_{11}	$\sum_{i=1}^n c_{1n}$	P_1
IPC ₂	c_{21}	o_{22}	.....	c_{2n}	o_{22}	$\sum_{i=1}^n c_{2n}$	P_2
.....
IPC _n	c_{n1}	c_{n2}	.....	o_{nn}	o_{nn}	$\sum_{i=1}^n c_{nn}$	P_n
TOTAL	-	-	.....	-	-	-	P

Os indicadores relativos à pervasividade interindustrial serão construídos a partir da matriz de produção de tecnologia que indica em linhas as indústrias (I_k), e em colunas as tecnologias (IPC i) com seus respectivos subtotais (l_{ki}). Nesta matriz, cada célula representa a frequência de ocorrências de uma tecnologia (IPC i) de empresas cuja principal atividade se localiza na indústria I_k :

	IPC ₁	IPC ₂	.....	IPC _n
I₁	l_{11}	l_{12}	.....	l_{1n}
I₂	l_{21}	l_{22}	.....	l_{2n}
.....				
I_n	l_{n1}	l_{n2}	.....	l_{nn}

Para estimar a pervasividade intersetorial foi considerada a importância da forma como as tecnologias são combinadas para a construção do conhecimento, isto é, utilizando a informação que pode ser extraída da representação da base de conhecimento industrial como uma rede. Cada indústria possui uma rede de conhecimento com características específicas, ou seja, um determinado conjunto de tecnologias (nós) e de combinações (ligações) entre elas que podem ou não se repetir de uma indústria para outra. Assim, para ser considerada pervasiva a tecnologia i deve ter uma grande variedade de combinações na rede de conhecimento geral, mas também deve estar espalhada entre as redes de

conhecimento de diferentes indústrias. As tecnologias são consideradas mais pervasivas quando suas relações ocorrem no maior número de indústrias diferentes e de forma menos concentrada.

Para formar a base de ocorrências utilizada neste estudo foram aplicados filtros à base agregada *Worldwide Patent Statistical Database* EPO (EPO PATSTAT - versão junho/2015) e Orbis/BvD. Os filtros foram utilizados para selecionar os pedidos de patentes referentes ao período de 2010-2016 e separar apenas os que possuem ao menos um depositante da indústria de transformação⁵. Além disso, os códigos de classificação das peças de conhecimento foram ajustados para o nível de 4 dígitos da Classificação Internacional de Patentes (IPC). A contagem das IPC4Ds de todas as patentes que resultaram após a aplicação dos filtros gerou a base de conhecimento da indústria de transformação para 2000-2016.

A identificação das tecnologias habilitadoras (TH) na base de patentes se deu a partir da agregação de códigos da classificação tecnológica IPC4D⁶ (Van de Velde *et al.* (2012) baseado em IPC/European Classification System - ECLA (2010)) em anexo. Os códigos IPC4D classificam a invenção em referência à sua área/áreas de uso/aplicação, logo a quantidade de códigos atribuídos a cada tecnologia habilitadora já indicaria que elas tendem a possuir uma ampla variedade de usos. No entanto, a forma como se realizam e atribuem os códigos também representa uma limitação da metodologia de classificação na identificação das subclasses correspondentes quando as tecnologias possuem várias áreas de aplicação, pois os códigos estão espalhados entre subclasses diferentes e se misturam com áreas de aplicações diferentes. Assim, é possível identificar as subclasses as quais as tecnologias habilitadoras estão associadas, mas não é possível separá-las completamente de outras tecnologias no nível de agregação IPC4D dado que pela própria natureza elas são aplicadas de variadas formas.

Os códigos IPC4D que pertencem a alguma das categorias de tecnologias habilitadoras foram substituídos na base de conhecimento por um código criado para representar a TH. Assim, a base resultante teve uma redução de 635 para 485 códigos IPC4D diferentes, inclusive as seis tecnologias habilitadoras. A representatividade de uma determinada tecnologia na base é dada, inicialmente, pela quantidade total de patentes em que o seu código IPC4D aparece ao menos uma vez⁷.

Um último aspecto de caráter metodológico é que não há uma correspondência exata entre a classificação tecnológica das patentes e a classificação de atividades da indústria (Grupp *et al.*, 1996). Pela natureza da evolução do uso e aplicação do conhecimento, as relações entre tecnologias e indústrias mudam significativamente ao longo do tempo. Assim, para este estudo as relações entre tecnologias e indústrias em um determinado período foram geradas pela observação das características dos depositantes e dos códigos IPC4D atribuídos às patentes. A indústria de transformação foi identificada nos pedidos de depósitos de patentes através das empresas cuja principal atividade pertence a um mesmo setor segundo a classificação de atividades econômicas NACE Rev. 2 (*European Classification of Economic Activities*). A contagem de peças de conhecimento em patentes com mais de um depositante e que estes realizam atividades distintas atribuiu um depósito da patente a cada divisão da classificação NACE Rev.2.

Os indicadores propostos neste estudo serão aplicados a todas as 485 tecnologias da base de conhecimento da indústria, porém, os resultados se apresentam de forma detalhada apenas para o grupo

⁵ A identificação dos depositantes foi feita a partir do setor de atuação da empresa, como referência foi utilizada a classificação do ORBIS-BvD segundo a classificação de atividades econômicas NACE REV.2 (*European Classification of Economic Activities*).

⁶ Nos casos em que foram atribuídos os mesmos códigos IPC4D a mais de uma tecnologia habilitadora (TH) nessa classificação, todas foram contadas integralmente como uma ocorrência para cada tecnologia. Também encontram-se diferentes níveis de agregação da classificação IPC, mas foram utilizados apenas os quatro primeiros dígitos de cada código que correspondem ao nível de subclasses tecnológicas.

⁷ As tecnologias habilitadoras neste estudo agregam vários códigos de IPC4D diferentes e, este fator pode influenciar na participação delas no total de patentes da indústria relativamente aos demais códigos IPC4D. Entretanto, as grandes diferenças de participação entre as próprias tecnologias habilitadoras, mesmo entre aquelas que agregam quantidades semelhantes de códigos IPC4Ds, como é o caso da fotônica com 7 e da micro e nanoeletrônica com 5, apontam para a existência de outros fatores além da quantidade de códigos para determinar o elevado número de ocorrências de cada TH na base.

de novas tecnologias habilitadoras. Os indicadores foram aplicados para cada uma das 24 indústrias (divisão NACE Rev.2), o que permite ter uma medida de pervasividade setorial, isto é, de como se apresentam e se conectam as tecnologias habilitadoras dentro de cada uma das indústrias contempladas.

3. Indicador multidimensional de pervasividade

A construção de um indicador multidimensional de pervasividade passa por três etapas. A primeira etapa é mensurar as características de pervasividade de cada tecnologia na rede de conhecimento do conjunto da indústria utilizando indicadores que se complementam: dois que medem a capacidade de combinação com outras tecnologias diferentes e dois que medem a aplicabilidade em setores diferentes. A segunda etapa é utilizar medidas de agregação setorial para os resultados de cada indicador de pervasividade para cada tecnologia. Por fim, na terceira etapa, os resultados para cada indicador agregado são incorporados a uma função de pertinência com metodologia *fuzzy* a fim de obter uma medida agregada do grau de pervasividade que cada TH alcançou.

3.1 Indicadores de pervasividade tecnológica nas redes de indústrias

A escolha dos indicadores deste estudo se baseou na disponibilidade de dados e nas suposições teóricas sobre o caráter multidimensional da pervasividade. Este estudo propõe o uso de quatro indicadores que são complementares para uma análise de pervasividade. Os indicadores calculados para cada tecnologia são: concentração da frequência por setor, centralidade de grau normalizado, peso médio das relações e centralidade de intermediação.

O primeiro indicador é a *concentração da frequência* por setor dada pela distribuição da quantidade de ocorrências de uma tecnologia entre setores. Este indicador se baseia na ideia de que a pervasividade está associada à presença abrangente de uma tecnologia entre setores distintos. Assim, quanto mais homogênea é a distribuição de uma tecnologia entre os setores, maior a onipresença dela nas diferentes bases de conhecimento da indústria e, portanto, mais pervasiva. Ao longo do tempo, espera-se que o efeito da aplicação ampla e abrangente de uma tecnologia entre indústrias seja a multiplicação da quantidade de novas patentes em que ela ocorre e o aumento da sua frequência média de ocorrência por setor. Porém, para impactar positivamente neste indicador de pervasividade, o crescimento da frequência deve estar associado a uma distribuição menos desigual entre os setores.

O segundo indicador é a centralidade de grau normalizado (G_i^*), que mede o escopo ou capacidade combinatória de uma tecnologia, o que deve se refletir num elevado número de coocorrências com outras tecnologias. A medida de grau é dada por $G_i \equiv k(v_i) = \sum_j A_{ij}$, sendo $s(v_i)$ o somatório de todas as arestas (A_{ij}) incidentes em um nó i . Um nó muito importante para a rede está ligado a muitos outros nós. Sendo o máximo grau possível de um nó qualquer da rede igual ao total de vértices menos um. O grau normalizado (G_i^*) é dado pelo total de vértices incidentes dividido pela quantidade de nós da rede (n) menos um. Desta forma, o grau normalizado varia entre 0 e 1, tal que

$$G_i^* = \frac{1}{n-1} \times G_i = \frac{s(v_i)}{n-1}$$

O grau normalizado mostra a dimensão da variedade de usos diferentes de um nó (tecnologia) pela quantidade de vértices incidentes (relações). Este indicador varia entre 0 - caso uma tecnologia esteja isolada na rede -, e 1 - quando ela realiza, ao menos uma vez, toda a variedade de combinações possíveis da rede. Quanto mais combinações diferentes uma tecnologia possuir, mais próximo de 1 será o valor da centralidade de grau normalizado na indústria e maior será a pervasividade.

O terceiro indicador é uma medida de força das ligações de um nó na rede. A absorção de uma tecnologia pela base de conhecimento também pode ser qualificada pela forma como ela se agrega, considerando além da variedade de relações também a sua frequência. A medida de *centralidade de grau ponderado* (G_i^P) é uma aproximação da contribuição de cada tecnologia à coerência da base de conhecimento porque também considera que as relações importantes para base de conhecimento tendem a

ser repetidas com mais frequência. O *peso médio das relações* (W') é dado pela relação entre o total de ligações (grau ponderado) e a variedade de ligações (grau) por setor. Este é uma razão entre o grau ponderado e o grau de uma tecnologia em um determinado setor, isto é:

$$W' = \frac{G_i^P}{G_i}$$

Quando o W' de uma tecnologia é relativamente elevado, isso sugere que as combinações com outras tecnologias na base costumam se repetir muito e esse é um indicativo de importância da tecnologia. Porém, para a questão específica da pervasividade, o peso médio das relações deve ser analisado com atenção à variedade de combinações e a distribuição entre os setores. Este indicador não diferencia se a frequência elevada das relações ocorre com um pequeno conjunto de tecnologias ou de forma diversificada. Neste sentido, um peso médio elevado, também pode indicar que o desenvolvimento é concentrado em determinadas combinações e setores, o que não seria caracterizado como pervasividade relativamente elevada. Mas, uma tecnologia pervasiva pode ter relações variadas, e o grau normalizado elevado, mas cuja frequência individual seja relativamente baixa, isto é, a pervasividade se definiria como o desenvolvimento de uma tecnologia em termos de diversidade de combinações entre indústrias em lugar de um desenvolvimento localizado em específicas indústrias de forma cumulativa.

O quarto indicador é a centralidade de intermediação normalizada (B_i^*) que indica o número de vezes que uma tecnologia pode ser o caminho mais curto para a formação de combinações entre outras tecnologias diferentes em cada setor. Os nós com maior valor de intermediação são considerados importantes porque possuem uma elevada conectividade na rede. O indicador de intermediação (*betweenness*) para v_i se define da seguinte forma

$$B_i = \sum a_{jh}(v_i)/a_{jh}$$

Em que a_{jh} é o número de caminhos mais curtos entre dois nós v_j e v_h , e $a_{jh}(v_i)$ é a quantidade de vezes que v_i esteve no caminho mais curto entre os outros dois. Para calcular a intermediação normalizada utiliza-se o número máximo possível de caminhos mais curtos em uma rede com n nós, excluindo-se v_i , que em uma rede não direcionada, é dado por: $[(n-1)(n-2)]/2 = (n^2 - 3n + 2)/2$. Assim, a medida de intermediação normalizada é dada por:

$$B_i^* = \frac{2 \times B_i}{(n^2 - 3n + 2)}$$

A importância de identificar as tecnologias que possuem o papel de mediador na rede é que elas têm um potencial relativamente maior de gerar um caminho de inovações para outras tecnologias. Esse indicador de centralidade de intermediação normalizada estará sempre entre 0 ou 1. Considera-se neste estudo, que as tecnologias que fazem a mediação entre muitos outros pares de tecnologias são mais pervasivas, portanto, quanto mais próximo de 1, maior o grau de pervasividade.

3.2 Indicadores agregados de pervasividade

Nesta etapa, os resultados entre indústrias serão agregados para uma medida por tecnologia para a indústria geral. As medidas de agregação aplicadas foram as seguintes:

- (1) a *média simples* do valor do indicador para os 24 setores da indústria;
- (2) o *ranking*, que indica a posição relativa de cada uma das tecnologias habilitadoras em relação às demais 484 tecnologias da base a partir do valor de média do indicador;
- (3) a *distribuição qui-quadrado*, a qual indica o quanto os resultados observados do indicador por setor (l_{ki}) se aproximam do valor médio (e), é calculada como $\chi_i^2 = \sum_{k=1}^n \frac{(l_{ki}-e)^2}{e}$, sendo $n = 24$. Essa medida deve mostrar o quanto o valor médio reflete uma característica observada de

forma homogênea entre setores ou se há fortes diferenças, apontando para a existência de especificidades setoriais;

- (4) o índice *Herfindahl-Hirschmann* que é calculado como a soma dos quadrados do indicador por setor (l_{ki}). Tal que $H_i = \sum_{k=1}^n l_{ki}^2$, sendo $n = 24$. Quanto mais próximo de zero for o índice H para uma tecnologia i , menor a concentração setorial. Essa medida foi utilizada apenas no indicador do grau de concentração interindustrial;

Para análise do indicador de *concentração*, considera-se que uma baixa concentração indica uma elevada capacidade de pervasividade e um maior potencial de aplicações dessas tecnologias entre setores (Cecere *et al.*, 2014). O índice de *Herfindahl-Hirschmann* (*IHH*) revela se a tecnologia se concentra ou se está distribuída de forma mais homogênea entre os setores. Quanto menor o *IHH*, maior a sua pervasividade. O *ranking* compara o valor de concentração intersetorial das ocorrências entre todas as tecnologias da base.

As tecnologias habilitadoras não estão entre as com distribuição mais homogênea entre indústrias (tabela 1). A melhor posicionada no *ranking* foi materiais avançados, ocupando apenas a 86ª posição e a pior foi a nanotecnologia que foi a 254ª colocada entre 485 tecnologias. Apesar da grande diferença de frequência na base de conhecimento entre a biotecnologia e a fotônica, ambas apresentaram semelhante grau de concentração intersetorial de 0,26 e ocuparam as posições 208 e 211 no *ranking*. Pelo indicador de concentração intersetorial, dado pelo *IHH*, a tecnologia com maior grau de pervasividade é materiais avançados, seguida por manufatura avançada, dado seus menores índices de concentração. A nanotecnologia está relativamente mais concentrada entre as tecnologias consideradas.

O segundo indicador é a *centralidade de grau normalizado* [entre 0 e 1] da tecnologia por indústria que permite observar se uma tecnologia tende a apresentar uma variedade de combinações baixa ou elevada. O *ranking*, neste caso, compara o valor médio da centralidade de grau normalizado entre todas as tecnologias da base.

As tecnologias de manufaturas e materiais avançados, biotecnologia e fotônica ocuparam a maiores posições de pervasividade intersetorial em termos de centralidade de grau normalizada (tabela 1). Isto significa que essas tecnologias formaram uma grande variedade de combinações na base da indústria. Nota-se que essa outra dimensão da pervasividade posicionou a nanotecnologia relativamente melhor no *ranking* pela sua capacidade de gerar uma ampla variedade de combinações do que em relação à sua frequência média entre setores, porque ela passou da posição 254ª para a 129ª. A medida de *qui-quadrado* da distribuição do grau da tecnologia entre setores avalia o quanto o valor do indicador se diferencia entre os diferentes setores. Ela mostra que, apesar de possuir uma média de grau elevada, algumas tecnologias, como a micro e nanoeletrônica e a fotônica também possuem uma distribuição mais desigual entre os setores. Isso quer dizer que em alguns setores essas tecnologias possuem uma variedade muito grande de combinações e em outras elas possuem bem poucas. Por outro lado, o *qui-quadrado* relativamente mais baixo ocorre para a manufatura avançada, que mantém uma média de grau normalizado elevada entre todos os setores, e para a nanotecnologia, que apesar de possuir grau médio bem mais baixo, mantém esse padrão na maioria dos setores. Para o indicador de centralidade de grau normalizado foi utilizada a média como medida de agregação de pervasividade intersetorial. Quanto maior o grau de uma tecnologia, maior a sua aplicabilidade em combinação com outras tecnologias e quanto a maior a média desse grau entre setores, maior a pervasividade setorial. As tecnologias mais pervasivas são a manufatura avançada, materiais avançados e a biotecnologia e a menos pervasiva deste conjunto é a nanotecnologia.

O indicador de peso médio das relações é a razão entre a quantidade de patentes de uma tecnologia e a variedade de combinações diferentes que ela forma em um determinado setor. Esse indicador avalia se as combinações que uma tecnologia forma são consistentes, ou seja, se elas se repetem com frequência. Quanto mais pervasiva a tecnologia, maior a tendência a formar muitas relações diferentes, e também, dada essa capacidade de múltiplas combinações, maiores as chances de repetição das relações porque elas são chave para formação de novas relações. No indicador de peso médio das relações estão implícitas as medidas de frequência e de variedade de relações de uma tecnologia por setor

e a característica de pervasividade é maior à medida que uma tecnologia está presente em mais setores e formando mais combinações.

A manufatura avançada possui a maior frequência média na base e, portanto, o peso médio de suas relações é relativamente menor do que o da biotecnologia e de materiais avançados (tabela 1). Isso ocorre porque, apesar de a manufatura avançada ser a tecnologia mais frequente nas patentes da indústria, ela está formando relações muito diversificadas, enquanto a biotecnologia é muito frequente, porém muito mais concentrada e com uma variedade de combinações relativamente menor, dada pela medida de grau. Tecnologias com frequência baixa registram também pesos médios relativamente baixos e posições mais baixas no *ranking*. Este é o caso da nanotecnologia (tabela 1). As outras medidas de agregação, como o *qui-quadrado*, também indicam que a biotecnologia e a fotônica tiveram relações de maior peso médio concentradas em alguns setores. Este resultado mostra que tecnologias concentradas em setores que possuem maior número de patentes não necessariamente seriam menos pervasivas, ou seja, a concentração nem sempre significará baixa pervasividade, dependendo da dinâmica de produção de conhecimento do setor. Neste caso, a biotecnologia possui a maior pervasividade porque possui o maior peso médio entre os setores. Já a nanotecnologia e a micro e nanoeletrônica se apresentam como as tecnologias menos pervasivas. Também segundo este critério, a pervasividade de materiais avançados, manufatura avançada e fotônica possui uma média setorial semelhante.

O indicador de *intermediação normalizado* revela um tipo diferente de pervasividade. Este se refere à capacidade de uma tecnologia de ser mediadora das relações entre outros pares de tecnologias. Na base da indústria, as tecnologias que mais se afastam de uma média próxima de zero indicam que exercem uma intermediação entre tecnologias que não possuem relação de coocorrência e possuem um papel importante na rede para aumentar as possibilidades de combinação e inovação. Essas tecnologias possuem relações variadas e servem de ponte entre outras tecnologias que não se combinam aproximando áreas de conhecimento diferentes na base do setor.

A manufatura avançada tem a maior média de centralidade de intermediação da rede, ou seja, possui a maior capacidade de gerar caminhos de inovação entre tecnologias e setores (tabela 1). Para o indicador de intermediação normalizada, a média foi a medida escolhida para agregação de pervasividade interindustrial. Assim, quanto maior o valor médio da intermediação, maior a pervasividade de uma tecnologia na indústria. Este indicador considera que uma dimensão da pervasividade de uma tecnologia seria sua capacidade de mediar a relação entre tecnologias diferentes e permitir novas combinações. Segundo esse critério, a tecnologia com maior pervasividade interindustrial é a manufatura avançada e, de forma menos expressiva, a biotecnologia e materiais avançados.

Tabela 1. Medidas para agregação dos indicadores de pervasividade por tecnologia

Indicador intersetorial	Medidas de agregação	Manufatura Avançada	Materiais Avançados	Biotecnologia	Micro e nano-eletrônica	Nano-tecnologia	Fotônica
Concentração	Qui-quadrado	5525	2819	6928	966	72	4990
	IHH	0,2	0,19	0,26	0,22	0,29	0,26
	Ranking	110	86	208	148	254	211
Grau normalizado	Média	0,56	0,42	0,38	0,18	0,05	0,31
	Qui-quadrado	1,4	1,7	1,7	2,4	1,2	2,4
	Ranking	1	2	3	10	129	4
Peso médio das relações	Média	19,8	22,3	32	7,8	3,9	19,1
	Qui-quadrado	537,1	853	3329,1	307,6	62,6	1007,6
	Ranking	7	4	3	43	169	9
Intermediação normalizado	Média	0,0015	0,0005	0,0006	0,0001	0	0,0002
	Qui-quadrado	0,1	0,034	0,043	0,011	0	0,01
	Ranking	1	3	2	20	224	5

Fonte: EPO PATSTAT / EPO (2015) e Orbis / BvD (2017). Elaboração própria.

Os quatro indicadores e suas formas de agregação enfatizaram diferentes formas de ver a pervasividade que não são excludentes, mas todo o contrário. Os indicadores se complementam entre si contribuindo para os diferentes aspectos em que pode ser definida a pervasividade interindustrial. Porém, para fins de comparação do grau de pervasividade entre as tecnologias, será utilizada apenas uma medida agregada para cada indicador no cálculo do índice *fuzzy*, o que se considera que será suficiente para mostrar a heterogeneidade entre as tecnologias analisadas.

Para classificar os indicadores agregados quanto ao seu grau de pervasividade, neste estudo, a escolha foi utilizar a teoria de conjuntos *fuzzy*. A metodologia *fuzzy* propõe a utilização de um intervalo de valores [0,1] para indicar graus de pertinência à condição declarada de pervasividade. Para cada um dos indicadores propostos deve ser atribuída uma função de pertinência para determinar o grau de pervasividade de cada tecnologia. O formato do conjunto *fuzzy* é definido pela função de pertinência utilizada e neste estudo optou-se por uma função que gera um conjunto de formato linear para todos os indicadores. A função linear indica um efeito constante sobre o grau de pervasividade a cada aumento da variedade de relações de uma tecnologia porque não faz diferença qual o grau inicial de pervasividade dela.

Para formar o conjunto linear foram utilizadas duas funções: a F_1 foi aplicada para o indicador de *concentração intersetorial* porque quanto maior o valor deste, menor é o grau de pervasividade da tecnologia, logo a função é decrescente; a F_2 foi aplicada aos indicadores de *centralidade de grau*, *peso médio das relações* e *intermediação* para os quais quanto maior o valor do indicador, maior é o grau de pervasividade e, portanto, a função deve ser crescente.

$$F_1(x_j) = \frac{x_{m\acute{a}x} - x_j}{x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n}}, \text{ para o indicador de } \textit{concentra\c{c}\~ao intersetorial},$$

$$F_2(x_j) = 1 - \frac{x_{m\acute{a}x} - x_j}{x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n}}, \text{ para os indicadores de } \textit{centralidade de grau}, \textit{ peso m\acute{e}dio das rela\c{c}\~oes e intermedia\c{c}\~ao}.$$

Onde $F(x_j)$ é o grau de pervasividade da tecnologia j ; $x_{m\acute{a}x}$ e $x_{m\acute{i}n}$ representam o valor máximo e o valor mínimo do indicador observado na base, respectivamente e x_j é valor do indicador observado para a tecnologia j . Quando a função de pertinência $F(x_j)$ toma valor 1, considera-se a tecnologia totalmente pervasiva, enquanto que se recebe valor 0, a tecnologia será considerada não pervasiva. Valores intermediários sugerem ‘pouco pervasiva’ se $0 < F(x_j) \leq 0,25$; ‘parcialmente pervasiva’, se $0,25 < F(x_j) \leq 0,55$; e ‘muito pervasiva’ se $0,55 < F(x_j) < 1$. Considerando as diferentes dimensões que foram medidas pelos indicadores, é possível que uma mesma tecnologia tenha respostas diferentes quanto ao grau de pervasividade de acordo com o resultado em cada indicador. A partir da função de pertinência foram calculados os índices *fuzzy* para cada indicador de todas as tecnologias da base de conhecimento. O valor máximo 1 indica maior grau de pervasividade e o mínimo 0 indica nenhuma pervasividade.

O índice *fuzzy* calculado para o indicador de concentração para todas as tecnologias da base resultou em classificação das tecnologias habilitadoras como muito pervasivas relativamente às demais, como se observa na tabela 2, porque a concentração média setorial dessas foi relativamente mais baixa. Todas as tecnologias pervasivas obtiveram uma concentração abaixo da média geral que foi de 0,32, logo elas estão mais dispersas entre os setores do que a média.

Tabela 2. Índice *fuzzy* da concentração intersetorial

Tecnologia	Índice	Classificação
<i>Manufatura avançada</i>	0,87	Muito Pervasiva
<i>Materiais Avançados</i>	0,88	Muito Pervasiva
<i>Bioteecnologia Industrial</i>	0,81	Muito Pervasiva

<i>Micro e nanoeletrônica</i>	0,85	Muito Pervasiva
<i>Nanotecnologia</i>	0,78	Muito Pervasiva
<i>Fotônica</i>	0,81	Muito Pervasiva

Fonte: EPO PATSTAT / EPO (2015) e Orbis / BvD (2017). Elaboração própria.

O índice *fuzzy* calculado para o indicador de grau normalizado para todas as tecnologias da base resultou em uma classificação das tecnologias habilitadoras mais heterogênea, como nota-se na tabela 3. Como o índice *fuzzy* considera os valores do indicador na comparação entre todas as tecnologias da base, a manufatura avançada alcançou o maior valor da base toda e foi considerada a mais pervasiva e juntamente com ela estão materiais avançados e biotecnologia industrial. A micro e nanoeletrônica e a fotônica, pelo índice que obtiveram, ficaram na faixa de parcialmente pervasivas e a nanotecnologia é pouco pervasiva relativamente às demais porque seu grau normalizado foi muito menor que as demais.

Tabela 3. Índice *fuzzy* do grau normalizado

Tecnologia	Índice	Classificação
Manufatura avançada	1,00	Muito Pervasiva
Materiais Avançados	0,75	Muito Pervasiva
Biotecnologia Industrial	0,68	Muito Pervasiva
Micro e nanoeletrônica	0,32	Parcialmente pervasiva
Nanotecnologia	0,09	Pouco pervasiva
Fotônica	0,54	Parcialmente pervasiva

Fonte: EPO PATSTAT / EPO (2015) e Orbis / BvD (2017). Elaboração própria.

O índice *fuzzy* calculado para o indicador de peso médio para todas as tecnologias da base resultou em uma classificação das tecnologias habilitadoras diferente das duas anteriores, como se observa na tabela 4. A manufatura avançada, que possui a maior variedade de relações da base, neste critério foi apenas parcialmente pervasiva em relação às demais tecnologias da base. As mais pervasivas neste grupo foram materiais avançados e biotecnologia industrial que possuem uma variedade elevada de ligações na rede e um número médio de ligações relativamente elevado. As menos pervasivas foram micro e nanoeletrônica e nanotecnologia.

Tabela 4. Índice *fuzzy* do peso médio

Tecnologia	Índice	Classificação
Manufatura avançada	0,55	Parcialmente pervasiva
Materiais Avançados	0,62	Muito Pervasiva
Biotecnologia Industrial	0,90	Muito Pervasiva
Micro e nanoeletrônica	0,22	Pouco pervasiva
Nanotecnologia	0,08	Pouco pervasiva
Fotônica	0,54	Parcialmente pervasiva

Fonte: EPO PATSTAT / EPO (2015) e Orbis / BvD (2017). Elaboração própria.

Para o indicador de intermediação, o cálculo do índice *fuzzy* resultou no maior valor do índice da base para a manufatura avançada, considerada, portanto, muito pervasiva (tabela 5). Ainda que no critério de quantidade relativa de ligações a manufatura avançada tenha alcançado um resultado mais baixo, a intermediação elevada indica que as suas relações tem papel importante na conectividade da rede, o que a torna mais pervasiva. Os materiais avançados e a biotecnologia foram considerados apenas parcialmente

pervasivas neste critério, a micro e nanoeletrônica e a fotônica foram pouco pervasivas e a nanotecnologia foi a única não pervasiva.

Tabela 5 - Índice fuzzy de Intermediação

Tecnologia	Índice	Classificação
Manufatura avançada	1,00	Muito Pervasiva
Materiais Avançados	0,34	Parcialmente Pervasiva
Biotecnologia Industrial	0,36	Parcialmente Pervasiva
Micro e nanoeletrônica	0,05	Pouco pervasiva
Nanotecnologia	0,00	Não pervasiva
Fotônica	0,15	Pouco pervasiva

Fonte: EPO PATSTAT / EPO (2015). Elaboração própria.

Como os indicadores foram calculados para todas as tecnologias da base, apenas em dois casos [centralidade de grau e de intermediação], uma dentre as tecnologias habilitadoras, a *manufatura avançada*, alcançou o valor máximo do índice *fuzzy*. Nos demais indicadores as tecnologias habilitadoras estiveram entre as mais pervasivas, mas não atingiram o máximo.

No estudo da pervasividade, o número de patentes por tecnologia e por indústria tem influência nos resultados. Como o grau de pervasividade é dado pela análise da presença de uma tecnologia na base de conhecimento de indústrias diferentes e formando combinações diferentes, as chances de ser mais pervasiva aumentam com a quantidade de patentes de uma tecnologia. Assim, por exemplo, para a nanotecnologia, onde existem fortes dificuldades técnicas em se apropriar desse conhecimento através de patentes⁸, é possível que ocorra certa subrepresentação do seu grau de pervasividade. Porém, os indicadores propostos explicam outros determinantes da baixa pervasividade da nanotecnologia que não apenas uma baixa frequência. A concentração industrial da nanotecnologia é relativamente elevada, ou seja, ainda se trata de uma tecnologia que está sendo desenvolvida em poucas indústrias. Seu grau normalizado também é baixo, o que indica que mesmo na indústria onde se concentra e se combina com outras tecnologias, as suas combinações são relativamente pouco diversificadas. Logo, não é apenas a baixa quantidade de patentes de nanotecnologia que resulta em um grau baixo de pervasividade nos indicadores.

3.3 Índice fuzzy de pervasividade (IFP)

Por fim, para criar um *ranking* que permita comparar o grau de pervasividade setorial de cada tecnologia os indicadores de pervasividade foram agregados em um único indicador composto utilizando o método *fuzzy*. Um indicador composto é uma métrica única de valor real derivada de um conjunto de componentes de indicadores por algum método de agregação. A construção de indicadores compostos se realiza em várias etapas e existem diferentes abordagens metodológicas. A abordagem escolhida para este estudo foi a teoria de conjuntos *fuzzy*.

Considerando as diferentes dimensões que foram medidas, é possível que uma mesma tecnologia tenha respostas diferentes quanto ao grau de pervasividade de acordo com o indicador. Para chegar a uma resposta única quanto ao grau de pervasividade da tecnologia é necessário atribuir pesos a cada um dos

⁸ As patentes em nanotecnologia tem mais desafios do que em outras tecnologias, devido ao seu caráter multidisciplinar, aplicações intersetoriais, reivindicações amplas, bem como maiores dificuldades em cumprir com os critérios de patenteabilidade de novidade, não-obviedade e aplicação industrial (Barpujari, 2010; Dang *et al.*, 2010; Ganguli e Jabade, 2012).

indicadores de forma não arbitrária. Para isso, utiliza-se uma medida em função da quantidade total de tecnologias da base, tal que:

$$w_j = \ln \left[\frac{n}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \right]$$

w_j = peso do indicador j ,

x_{ij} = valor do índice *fuzzy* para o indicador j calculado para a tecnologia i ,

n = quantidade total de tecnologias.

Essa forma de atribuir pesos relativos aos indicadores resulta em w_j maior para o indicador que apresenta índices x_{ij} mais diversos entre as tecnologias e, portanto, valoriza a dimensão de pervasividade que é menos homogênea e que mais diferencia as tecnologias.

O grau de pervasividade de cada tecnologia é uma média ponderada simples dada pelos índices *fuzzy* de cada indicador e os pesos destas variáveis, conforme a seguinte fórmula:

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^4 x_{ij} w_j}{\sum_{j=1}^4 w_j}$$

β_i = índice *fuzzy* multidimensional agregado da tecnologia i .

x_{ij} = valor do índice *fuzzy* para o indicador j calculado para a tecnologia i .

w_j = peso do indicador j .

Quanto mais próximo de zero, menor é a pervasividade e quanto mais próximo de um for o valor para uma tecnologia habilitadora maior é o seu grau de pervasividade.

Para agregar os indicadores e formar um único índice composto de pervasividade foram calculados os pesos de cada indicador pela fórmula apresentada anteriormente. Quanto maior a diferenciação entre os valores das observações em cada indicador, maior se torna o seu peso, assim a centralidade de intermediação e de grau resultaram com os maiores pesos, de acordo com a tabela 6.

Tabela 6. Peso dos indicadores

Indicadores	Medida de agregação	Peso do indicador
Concentração setorial	HHI	0,3
Centralidade de grau	Média	2,6
Peso médio das relações	Média	2,5
Centralidade de Intermediação	Média	4,5

Fonte: EPO PATSTAT / EPO (2015). Elaboração própria.

Aplicando os pesos aos resultados dos indicadores para todas as IPC4Ds foi possível diferenciar o papel de cada uma na rede de conhecimento. A tabela 10 apresenta as dez tecnologias entre as 485 que compõem a base de conhecimento da indústria que obtiveram os maiores índices *fuzzy* de pervasividade composto. Na tabela, as quatro colunas à esquerda mostram os resultados dos indicadores que foram agregados de forma ponderada para compor o índice *fuzzy* de pervasividade (IFP) para cada tecnologia. Na quinta coluna encontram-se os resultados para o índice *fuzzy* de pervasividade composto e na última coluna está o *ranking* de pervasividade segundo o IFP composto pelos quatro indicadores.

Dentre as novas tecnologias habilitadoras, as que mais se destacaram foram a *manufatura avançada*, a *biotecnologia industrial*, os *materiais avançados* e a *fotônica*, que obtiveram os maiores

valores de pervasividade no IFP composto e os primeiros lugares do *ranking* de pervasividade. A micro e nanoeletrônica ficou em décimo no *ranking* com uma diferença significativa em relação às primeiras colocadas. A nanotecnologia teve a pior colocação entre as tecnologias habilitadoras, e sua posição no ranking de pervasividade foi apenas a 197ª. Entre as tecnologias mais pervasivas da base de conhecimento da indústria também se destacaram IPC4Ds de outras áreas de conhecimento como produtos farmacêuticos (A61K), outra maquinaria especial (B29C), manejo (B65D), engenharia civil (B01J) e tecnologia da meio-ambiente (B01D).

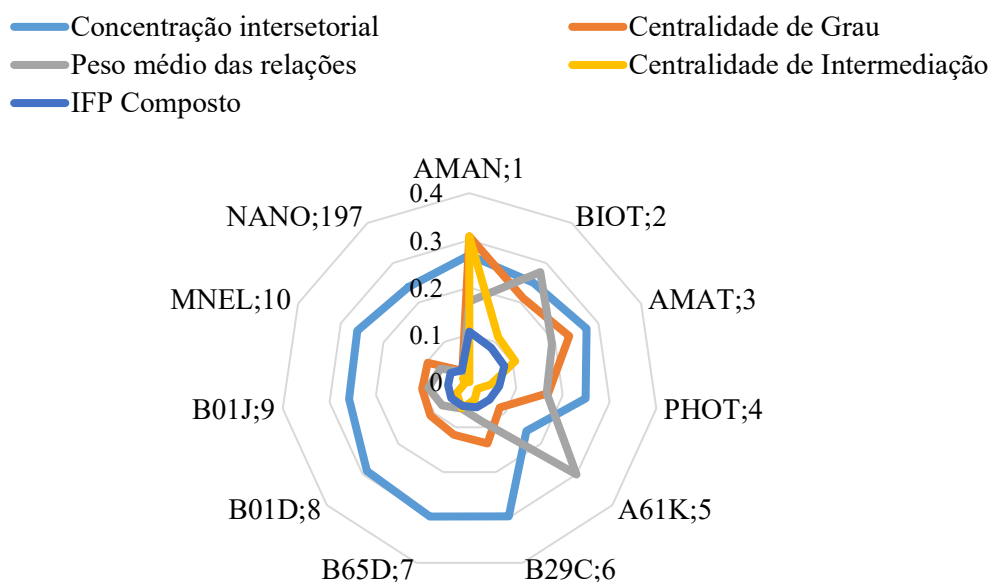
Tabela 7 - Índice Fuzzy de Pervasividade

Posição no ranking	Tecnologias*	Concentração (HHI)	Grau (Média)	Peso médio das relações (Média)	Intermediação (Média)	IFP Composto
1	<i>Manufatura Avançada</i>	0,27	0,31	0,17	0,31	0,106
2	<i>Biotecnologia</i>	0,25	0,21	0,28	0,11	0,086
3	<i>Materiais Avançados</i>	0,27	0,23	0,19	0,11	0,081
4	<i>Fotônica</i>	0,25	0,17	0,17	0,05	0,063
5	A61K (Produtos farmacêuticos)	0,16	0,08	0,30	0,02	0,057
6	B29C (Outra maquinaria especial)	0,30	0,14	0,09	0,04	0,056
7	B65D (Manejo)	0,30	0,12	0,06	0,06	0,054
8	B01D (Tecnologia de meio-ambiente)	0,29	0,11	0,08	0,04	0,051
9	B01J (Engenharia civil)	0,26	0,10	0,09	0,01	0,046
10	<i>Micro e nanoeletrônica</i>	0,26	0,10	0,07	0,02	0,045
197	<i>Nanotecnologia</i>	0,24	0,03	0,03	0,00	0,029

Fonte: EPO PATSTAT / EPO (2015) e Orbis / BvD (2017). Elaboração própria.

Considerando todos os indicadores que compõem o índice *fuzzy* de pervasividade, no Gráfico 1 percebe-se que a característica que menos diferenciou essas dez tecnologias, porque elas obtiveram um resultado semelhante, foi a distribuição setorial das suas ocorrências. Enquanto que, a característica que mais destacou o grau de pervasividade da *manufatura avançada* em relação às demais tecnologias foi sua centralidade de intermediação.

Gráfico 1. Pervasividade interindustrial desagregada



5. Considerações finais

Este trabalho tinha como objetivo medir o grau de pervasividade setorial das novas tecnologias habilitadoras (*Tecnologias de manufatura avançada, Materiais Avançados, Biotecnologia Industrial, Micro e nanoeletrônica, Nanotecnologia e Fotônica*) com relação às demais tecnologias nas bases de conhecimento das indústrias de transformação entre 2000 e 2016. Para isto, foi desenvolvido o *índice fuzzy de pervasividade* (IFP), isto é, um índice multidimensional que considera como estas tecnologias se combinam nas bases industriais de conhecimento representadas mediante redes.

Os quatro indicadores que compõem o IFP são: (i) concentração da frequência por setor; (ii) centralidade de grau normalizado; (iii) peso médio das relações; e (iv) centralidade de intermediação. Estes indicadores foram agregados a partir do método de conjuntos *fuzzy* em um índice composto de pervasividade. As tecnologias de manufatura avançada apresentaram o maior grau de pervasividade, seguidas da biotecnologia industrial, os materiais avançados e a fotônica. Este grupo de tecnologias ocupou os primeiros lugares do *ranking* de pervasividade entre todas as 485 tecnologias contempladas. A micro e nanoeletrônica ficaram em décimo lugar no *ranking* com uma diferença significativa em relação às primeiras colocadas. A nanotecnologia foi a menos pervasiva das tecnologias habilitadoras, sendo sua posição no *ranking* de pervasividade de 197^a. O resultado de micro e nanoeletrônica e da nanotecnologia não necessariamente significa que sejam menos importantes se se leva em consideração que podem se encontrar em fases mais recentes de desenvolvimento e que os indicadores construídos com patentes podem estar subvalorando os resultados de inovação nestas áreas.

O estudo mostrou que a natureza da pervasividade está relacionada com a forma como as tecnologias se combinam para a construção do conhecimento. Em geral, a metodologia de redes reforça a ideia de que a pervasividade está associada com as oportunidades tecnológicas de natureza intersetorial em sentido de Klevorick *et al.* (1995), isto é, pelas possibilidades de aplicação de uma tecnologia em diferentes indústrias dada a forma em que elas se inter-relacionam ou compartilham características de conhecimento comuns (convergência ou complementariedade entre bases de conhecimento). O aproveitamento destas oportunidades passa também por mecanismos de seleção determinados, sobretudo, pelas relações produtor-usuário ou produtor-fornecedor. A fase do ciclo de vida da base de conhecimento, seja ela agregada ou setorial, não parece determinar o grau de pervasividade da tecnologia, particularmente porque o IFP foi calculado como uma medida relativa.

Além de medir o grau de pervasividade setorial, esta análise revelou a importância das tecnologias habilitadoras para as bases de conhecimento da indústria. Concretamente, essas tecnologias se revelaram "peças-chave" para inovação industrial, pois elas representam muitas novas combinações nas redes de conhecimento industrial em que se inserem. Soma-se à propriedade de ampla capacidade de combinação com outras tecnologias, a oportunidade de que as tecnologias habilitadoras ainda estão em uma fase incipiente de desenvolvimento e, com isso, as suas possibilidades de aplicação industrial ainda estão longe de se encontrar esgotadas.

Neste sentido, o trabalho pode antecipar alguns desdobramentos de caráter normativo em torno de dois eixos complementares. Em primeiro lugar, o trabalho revela o potencial de impacto deste tipo de tecnologias e as indústrias onde se inserem de forma mais intensa. Estas formas de inserção apontam as trajetórias tecnológicas que estão se desenvolvendo a partir das tecnologias habilitadoras e representam os campos de aplicação onde focalizar as políticas de fomento à inovação industrial. Em segundo lugar, esta metodologia identifica as indústrias em que as tecnologias habilitadoras encontram maiores oportunidades

de aplicação. Ou seja, desde o ponto de vista da política industrial, esta metodologia permite adiantar os impactos destas tecnologias para seu desenvolvimento futuro e elaborar planos de desenvolvimento industrial que levem em consideração estes impactos. Neste sentido, o trabalho levanta novas questões também relevantes desde um ponto de vista normativo: quem são os inovadores?; quais os incentivos de inovação em termos concorrenciais?; representam as novas tecnologias trajetórias habilitadoras em termos de novos métodos de produção, empregos, etc.? Quais seus efeitos sobre a produtividade geral da economia e sobre o crescimento? Estas são sem dúvida questões que devem estar na pauta de um planejador.

Anexo

Lista dos códigos IPC4D associados às tecnologias habilitadoras

Tecnologias habilitadoras	Códigos IPC4D
<i>Micro e nanoeletrônica</i>	B82Y 25, H01H 57/7, H01L, H05K 1, H03B 5/32, H05K 3
<i>Nanotecnologia</i>	B81C, B82B, B82Y
<i>Fotônica</i>	F21K, F21V, G02B 1, G02B 5, G02B 6, G02B 13/14, H01L 25/00, H01L 31, H01L 51/50, H01L 33, H01S 3, H01S 4, H01S 5, H02N 6, H05B 31, H05B 33
<i>Biotecnologia Industrial</i>	C02F 3/34, C07C 29/00, C07D 475/00, C07K 2/00, C08B 3/00, C08B 7/00, C08H 1/00, C08L 89/00, C09D 11/04, C09D 189/00, C09J 189/00, C12M, C12N, C12P, C12Q, C12S, G01N 27/327
<i>Materiais Avançados</i>	B32B 9, B32B 15, B32B 17, B32B 18, B32B 19, B32B 25, B32B 27, B82Y 30, C01B 31, C04B 35, C08F, C08J 5, C08L, C22C, D21H 17, H01B 3, H01F 1, H01F 1/12, H01F 1/34, H01F 1/44
<i>Manufatura avançada</i>	B03C, B06B 1/6, B06B 3/00, B07C, B23H, B23K, B23P, B23Q, B25J, G01D, G01F, G01H, G01L, G01M, G01P, G01Q, G05B, G05D, G05F, G05G, G06M, G07C, G08C; A21C, A22B, A22C, A23N, A24C, A41H, A42C, A43D, B01F, B02B, B02C, B03B, B03D, B05C, B05D, B07B, B08B, B21B, B21D, B21F, B21H, B21J, B22C, B23B, B23C, B23D, B23G, B24B, B24C, B25D, B26D, B26F, B27B, B27C, B27F, B27J, B28D, B30B, B31B, B31C, B31D, B31F, B41B, B41C, B41D, B41F, B41G, B41L, B41N, B42B, B42C, B44B, B65B, B65C, B65H, B67B, B67C, B68F, C13C, C13D, C13G, C13H, C14B, C23C, D01B, D01D, D01G, D01H, D02G, D02H, D02J, D03C, D03D, D03J, D04B, D04C, D05B, D05C, D06B, D06G, D06H, D21B, D21D, D21F, D21G, E01C, E02D, E02F, E21B, E21C, E21D, E21F, F04F, F16N, F26B, G01K, H05H (em caso de coocorrência com G06)

Fonte: Van de Velde *et al.* (2012) baseado em IPC/European Classification System - ECLA (2010).

Referências bibliográficas

BRESCHI, Stefano; LISSONI, Francesco. Knowledge networks from patent data. In: **Handbook of quantitative science and technology research**. Springer Netherlands, 2004. p. 613-643.

- BRESCHI, Stefano; LISSONI, Francesco; MALERBA, Franco. Knowledge-relatedness in firm technological diversification. *Research Policy*, v. 32, n. 1, p. 69-87, 2003.
- CECERE, Grazia; CORROCHER, Nicoletta; GOSSART, Cédric; OZMAN, Muge. Technological pervasiveness and variety of innovators in Green ICT: A patent-based analysis. *Research Policy*, v. 43, n. 10, p. 1827-1839, 2014.
- GANGULI, Prabuddha; JABADE, Siddharth. **Nanotechnology Intellectual Property Rights: Research, Design, and Commercialization**. CRC Press, 2012.
- GRUPP, H.; MÜNT, G.; SCHMOCH, U. Assessing Different Types of Patent Data for Describing High-Technology Export Performance. In **Innovation, Patents and Technological Strategies**, p. 271-287. Paris: OECD, 1996.
- HALL, Bronwyn H.; JAFFE, Adam; TRAJTENBERG, Manuel. Market value and patent citations. **RAND Journal of economics**, p. 16-38, 2005.
- KLEVORICK, A. K.; LEVIN, R. C.; NELSON, R. R.; WINTER, S. G. On the sources and significance of interindustry differences in technological opportunities. *Research Policy*, v. 24, n. 2, p. 185-205, 1995.
- KRAFFT, Jackie; QUATRARO, Francesco; SAVIOTTI, Pier Paolo. The knowledge-base evolution in biotechnology: a social network analysis. *Economics of Innovation and New Technology*, v. 20, n. 5, p. 445-475, 2011.
- KREUCHAUFF, Florian; TEICHERT, Nina. Nanotechnology as general purpose technology. Working Paper Series in Economics, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2014.
- MALERBA, Franco; ORSENIGO, Luigi. Schumpeterian patterns of innovation are technology-specific. *Research Policy*, v. 25, n. 3, p. 451-478, 1996.
- PATEL, Pari; PAVITT, Keith. The technological competencies of the world's largest firms: complex and path-dependent, but not much variety. *Research Policy*, v. 26, n. 2, p. 141-156, 1997.
- PATEL, Parimal; PAVITT, Keith. National innovation systems: why they are important, and how they might be measured and compared. *Economics of innovation and new technology*, v. 3, n. 1, p. 77-95, 1994.
- PAVITT, Keith. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. *Research Policy*, v. 13, n. 6, p. 343-373, 1984.
- ROSENBERG, Nathan. Technological change in the machine tool industry, 1840–1910. *The Journal of Economic History*, v. 23, n. 4, p. 414-443, 1963.
- SAVIOTTI, Pier Paolo. Knowledge networks: structure and dynamics. In: *Innovation Networks*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 19-41.
- VAN DE VELDE, Els; DEBERGH, Pieterjan; WYDRA, Sven; SOM, Oliver; HEIDE, Marcel de. Key Enabling Technologies (KETs) Observatory. Second Report for the European Commission, DG, 2015.