

TRAJETÓRIA TECNOLÓGICA: UMA BREVE REVISÃO DE SEMICONDUTORES

TECHNOLOGICAL TRAJECTORY: A BRIEF REVIEW OF SEMICONDUCTORS

Alexandre Ricardo de Aragão Batista¹

Ricardo Sigalla²

Denise Gomes de Gomes³

RESUMO: O presente trabalho tenta responder qual é a trajetória tecnológica ou tecnoeconômica dos semicondutores. Objetiva mostrar a concepção, o desenvolvimento e os impactos contemporâneos que o artefato causou sob a óptica do que se entende por inovação. A Metodologia baseia-se, além de uma breve revisão teórica, de revisitações das propriedades materiais, procedimentos de pesquisas e análises de seu estado da arte. É observado que a descoberta do transistor foi, numa visão microscópica, um achado incremental, já macroscopicamente foi disruptivo no fluxo econômico. Suas tecnologias derivadas mudaram o fluxo circular econômico que, no sentido de Schumpeter, destruía e criava produtos e processos, com impactos inclusive institucionais. O estudo não rejeita a observação de Dosi em que sua trajetória esteja num espaço multidimensional, arrastando e direcionando produtos, serviços e a própria vida econômica, bem como a análise de Schumpeter, pois acarreta ondas de inovações. A revisão aqui realizada contribui no apoio s assertivas de que as revoluções paradigmáticas contemporâneas, *a la* Dosi ou tecnoeconômico, no estilo de Perez, são alicerçadas em semicondutores.

Palavras-chave: Inovação e Invenção: Processos, Inovação Tecnológica

Classificação JEL: O31, Q55

ABSTRACT: This paper tries to answer what is the technological or techno-economic trajectory of semiconductors. It aims to show the conception, development and contemporary impacts that the artifact caused under the lens of what is meant by innovation. The Methodology is based, besides a brief theoretical revision, of revisions of material properties, research procedures and analyzes of its state of the art. It is observed that the discovery of the transistor was, in a microscopic view, an incremental finding, but macroscopically, it was disruptive in the economic flow. Its derivative technologies have shifted the circular economic flow that, in Schumpeter's sense, destroyed and created products and processes, with even institutional impacts. The study does not reject Dosi's observation that his trajectory is in a multidimensional space, dragging and directing products, services and economic life itself, as well as Schumpeter's analysis, because it brings waves of innovation. The review here contributes to support the assertions that contemporary paradigmatic revolutions, *a la* Dosi or tecnoeconomic, in the style of Perez, are based on semiconductors.

Keywords: Innovation and Invention: Processes, Technological Innovation.

1Mestrando em Economia pelo IE-UNICAMP. E-mail: alearagao@netscape.net

2Mestrando em Economia pelo IE-UNICAMP. E-mail: ricardosigalla2@gmail.com

3Mestrando em Economia pelo PPGED-UFSM. E-mail: gomes_de_gomes@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tenta responder qual é a trajetória tecnológica ou tecnoeconômica dos semicondutores. Objetiva mostrar a concepção, o desenvolvimento e os impactos contemporâneos que o dispositivo causou sob a óptica do que se entende por inovação. Tratam-se, além de uma breve revisão teórica, de revisitações das propriedades materiais, procedimentos de pesquisas e análises de seu estado da arte.

Embora amplamente utilizado e até mesmo comentado, pouco se diz ou se fala a respeito das características dos semicondutores no mundo acadêmico dos estudos econômicos. Ainda que alguns autores, sobretudo Giovanni Dosi, Nelson e outros, tenham muito trabalhado com o tema, há certa restrição literária quando se entra a fundo no assunto. Isto é completamente natural. Tal limitação, porém, pode fazer com que o artefato seja considerado ainda como uma caixa preta. Dado que o dispositivo está completamente contextualizado na vida econômica, é interessante desvendar seu mecanismo. É claro que, para isso, é necessário um estudo um pouco mais diferenciado que envolve interdisciplinaridade entre economia e eletrônica.

Mas para além de suas propriedades e histórico de pesquisas que acabaram revelando o transistor e conseqüentemente os *chips*, é preciso entender o como que se sucederam seus impactos na vida contemporânea. Isto é obtido, neste trabalho, por meio de abordagens teóricas, tais como as vistas em Schumpeter, Dosi, Freeman e Perez. Estas abrangem os conceitos de inovação, processos de inovação, trajetórias e paradigmas tecnológicos.

Uma vez com conceituações teóricas mais sólidas, é possível verificar a trajetória tecnológica que os semicondutores passam a seguir, bem como suas formas, desenvolvimentos e impactos no fluxo econômico. Do átomo com 4 elétrons na última camada às tecnologias baseadas em Redes Neurais Artificiais, infere-se haver uma trajetória em comum, e esta parece ser a dos semicondutores.

Além desta Introdução. A seção 2 aborda a inovação e o processo de inovar, bem como conceitos aqui abrangidos. A seção 3 está dividida em quatro subseções e trata desde o que se entende por semicondutores, suas propriedades, desenvolvimento dos transístores até seu estado da arte. Na seção 4, fazem-se algumas considerações finais e, em seguida, são apresentadas as referências bibliográficas.

2.A INOVAÇÃO E O PROCESSO DE INOVAR

No campo de estudo da economia a inovação começou a ganhar um papel central para a explicação do desenvolvimento econômico apenas na metade do século XX, quando os estudos de Solow (1957) e Abramovitz (1956) ao medir a influência dos fatores de produção “capital” e “trabalho” no crescimento do PIB, concluem que cerca de 85% daquele crescimento não podia ser explicado por nenhum dos dois fatores de produção. Segundo Mowery e Rosenberg (2005):

O “resíduo” de 85%, notavelmente elevado, sugeriu que o crescimento da economia norte-americana no século XX resultou predominantemente da extração de mais produto de cada unidade de insumo na atividade econômica, ao invés de mero uso de mais insumos (MOWERY, ROSENBERG, 1998 [2005], p. 14).

No início do século XX, entretanto, Schumpeter (1988) já destacava o papel central da inovação no processo de desenvolvimento das economias capitalistas. Para ele a inovação era o que explicava os lucros extraordinários da firma que, por sua vez, explicavam a busca pela inovação como busca pela diferenciação de custo num ambiente de concorrência capitalista, o que permitia à firma inovadora obter lucros extraordinários durante o tempo em que a inovação permanecesse sem uso pelos concorrentes. Tratando sobre a inovação na tecelagem com a introdução do tear Schumpeter (1988) afirma:

Assim como a introdução de teares é um caso especial da introdução de maquinaria em geral, também a introdução de maquinaria é um caso especial de todas as mudanças no processo produtivo no sentido mais amplo, cujo objetivo é produzir uma unidade de produto com menos dispêndio e assim criar uma discrepância entre o seu preço existente e seus novos custos [...] Assim tem origem uma diferença entre as receitas, que são determinadas de acordo com os preços que eram de equilíbrio, ou seja o custo, quando só o trabalho manual estava sendo utilizado, e as despesas, que agora são essencialmente menores por unidade de produto do que para outros estabelecimentos (SCHUMPETER, 1912 [1988], p. 89-90).

Sobre as formas de novas combinações dos meios de produção que levam à inovação Schumpeter (1988) cita cinco tipos: (a) produto, (b) processo, (c) novo mercado, (d) nova fonte de matéria-prima e (e) mudança na estrutura concorrencial. Tais inovações podem ter ou não relação com a descoberta de alguma nova tecnologia. Portanto, deve-se diferenciar a questão da invenção (ou descoberta científica) da questão da inovação, por mais que as duas categorias estejam conectadas. Para Schumpeter (1988):

Enquanto não forem levadas à prática, as invenções são economicamente irrelevantes [...] Além disso, as inovações, cuja realização é função dos empresários, não precisam necessariamente ser invenções (SCHUMPETER, 1912 [1988], p. 62).

Entre o processo de invenção e a difusão da inovação dela derivada há normalmente um longo caminho. O modelo convencional do processo de inovação, desenvolvido após a Segunda Guerra, é conhecido como modelo de “transferência tecnológica”. Segundo Stokes (2009) tal modelo consiste numa sequência de estágios dependentes cada um do estágio anterior na seguinte ordem: (a) pesquisa básica⁴, (b) pesquisa aplicada, (c) desenvolvimento e (d) inovação. Para o autor essa seria uma maneira simplista e equivocada de analisar o processo de inovação na medida em que pesquisas básica e aplicada aparecem como categorias separadas e apresentam uma sequência única e hierarquizada dos estágios no processo de inovação:

Mas a falha mais grave na forma do paradigma do pós-guerra é sua premissa de que os fluxos [...] entre ciência e a tecnologia se dão sempre num mesmo e único sentido, *da* descoberta científica *para* a inovação tecnológica; ou seja, que a ciência é *exógena* à tecnologia [...] Houve, na verdade, um notável fluxo *inverso*, da tecnologia para a ciência, desde a época de Bacon até a Segunda Revolução Industrial, com os cientistas modelando a tecnologia bem-sucedida, mas contribuindo muito pouco para melhorá-la [...] Sadi Carnot deu um importante passo em direção à termodinâmica por meio do estudo das máquinas a vapor, mas descobriu que a prática da engenharia já havia antecipado as prescrições da teoria por ele desenvolvida [...] essa tendência [de aumento da contribuição da ciência para a tecnologia] acelerou-se no século XX, com mais e mais tecnologia realmente *baseada* na ciência. Mas a outra mudança, complementar desta e muito menos conhecida, é que os desenvolvimentos tecnológicos tornaram-se uma fonte muito mais importante de fenômenos para os quais a ciência precisou buscar explicações (STOKES, 1997 [2009], p. 42-43).

Dosi (2006) nos dá outra concepção sobre o processo de inovação, trazendo a ideia de paradigmas e trajetórias tecnológicas, em que destaca que a mudança técnica não ocorre ao acaso, pois as direções da mudança podem depender do estado pouco ou muito desenvolvido da tecnologia em uso (fronteira tecnológica) e do nível dessa tecnologia que a firma em questão já alcançou. As direções ou trajetórias do progresso técnico (desenvolvimento ou melhoramento de produtos e processos baseados em certa tecnologia) se dão dentro do que o autor denominou paradigma tecnológico. Tal paradigma seria um “agrupamento de

⁴ Segundo Stokes (1997), pesquisa básica nesse modelo é compreendida como uma pesquisa que não visa fins práticos, que busca contribuir para o “conhecimento em geral e ao entendimento da natureza e de suas leis”. Enquanto a pesquisa aplicada é aquela voltada à solução de problemas práticos relacionados à indústria por exemplo, utilizando para isso o conhecimento acumulado oriundo da pesquisa básica.

tecnologias” que definiria um “padrão de solução de problemas tecnológicos *selecionados*, baseados em princípios *selecionados*, derivados das ciências naturais, e em tecnologias materiais *selecionadas*” (p.41), enquanto a ‘trajetória tecnológica’ seria a *atividade* normal de resolução dos problemas com base no paradigma tecnológico.

Um paradigma tecnológico (ou programa de pesquisa) incorpora fortes prescrições sobre as direções da mudança técnica a perseguir e a negligenciar [...] determinadas tecnologias específicas, com suas próprias “soluções” para os problemas, por meio da exclusão de outras tecnologias nocionalmente possíveis (DOSI, 1984 [2006], p. 42).

De acordo com Dosi (2006), no período inicial de uma trajetória tecnológica, nas etapas de desenvolvimento anteriores à comercialização, o papel do mercado (demanda) no direcionamento da trajetória é muito pequeno. Critérios relacionados à exequibilidade, negociabilidade, rentabilidade, potencial de economia de mão-de-obra (mecanização), papel do poder público no financiamento e garantia de mercado para inovações específicas, além do histórico tecnológico das firmas são mais relevantes nesse estágio do processo de inovação, dentro de uma trajetória tecnológica.

Em outras palavras, o lado da oferta determina o “universo” de possíveis modalidades, através das quais são satisfeitas as “necessidades” genéricas ou as exigências produtivas – que como tal, não possuem qualquer significado econômico direto (DOSI, 1984 [2006], p.51).

Por outro lado, quanto mais próxima a trajetória tecnológica está do estágio de comercialização mais o mercado ganha importância, funcionando como um mecanismo de feedback que, normalmente, implica avanços *dentro* de uma trajetória tecnológica dado que não é simples nem rápida a transição de uma trajetória tecnológica para outra, pois a trajetória alternativa tende, naturalmente, a ser menos desenvolvida, pois há menos conhecimentos acumulados em relação à anterior quanto à sua aplicação produtiva. Para o Dosi (2006) as novas trajetórias:

surtem quer em relação a novas oportunidades abertas por desenvolvimentos científicos, quer a crescentes dificuldades de seguir adiante numa dada direção tecnológica (por razões tecnológicas ou econômicas, ou ambas) (DOSI, 1984 [2006], p.53).

Por fim, não se pode esquecer que a inovação não trata apenas de avanços tecnológicos, mas, também, de mudanças na forma como se combinam os meios de produção, incluindo-se as formas organizacionais das firmas e as instituições do espaço econômico. Freeman e Perez (1988) classificam a inovação em quatro formas distintas: (a) inovações incrementais, (b) inovações radicais, (c) novos sistemas tecnológicos e (d) mudanças dos paradigmas tecnoeconômicos. As *inovações incrementais* são aquelas mais relacionadas aos engenheiros ligados à produção (*learningbydoing*⁵) e aos consumidores (*learningbyusing*⁶), portanto, são mais conectadas ao mercado e promovem um crescimento pequeno e estável da produtividade. As *inovações radicais* são descontínuas no tempo e estão associadas ao processo ativo de P&D das empresas, universidades e laboratórios governamentais. Elas dão origem a novos mercados, novas tecnologias e estão associadas a ‘booms’ de investimento na indústria que se beneficia de tal inovação e, portanto, os efeitos das inovações radicais devem ter impacto econômico reduzido e localizado sobre a economia, na medida em que não forem disseminadas para o uso em diversos setores diferentes. Os *novos sistemas tecnológicos* estão associados a mudanças abrangentes da tecnologia, tendo seus efeitos sobre diversos setores já existentes (absorvendo tais inovações) e criando novos setores ligados à nova tecnologia. Segundo Freeman e Perez (1988):

They are based on a combination of radical and incremental innovations, together with *organizational* and *managerial* innovations affecting more than one or few firms [...] An obvious example is the cluster of synthetic materials innovations, petro-chemical innovations, machinery innovations in injections moulding and extrusion (p. 46-47).

As mudanças dos paradigmas tecnoeconômicos são a grande novidade da abordagem de Freeman e Perez (1988). Elas estão associadas a mudanças abrangentes em alguns sistemas tecnológicos de modo que a quase totalidade da economia precisa absorver tais mudanças em sua lógica produtiva, gerencial e organizacional, passando por um período de ajustamento econômico, social e institucional de adaptação ao novo paradigma. A mudança de paradigma tecnoeconômico ocorre a partir de uma transformação geral da percepção gerencial e da engenharia quanto à maior produtividade e lucro que a mudança de paradigma pode gerar.

⁵Desenvolvimentos de produto ou processo que se adquirem com experimentos numa atividade rotineira na produção.

⁶Desenvolvimentos de produto ou processo que se adquirem com intercâmbio de informações (feedbacks) entre empresa e consumidores a partir da utilização do produto da empresa pelos consumidores.

O novo paradigma ainda teria que cumprir alguns requisitos para se tornar dominante, tendo seus insumos (ou “keyfactor”) que (a) prover rápidas e consistentes reduções dos custos, (b) ter disponibilidade de oferta percebida como quase ilimitada no longo prazo e (c) ter um potencial de incorporação em diversos setores econômicos, levando a um conjunto de inovações redutoras de custos, como foi o caso do petróleo e da microeletrônica, em especial dos semicondutores, como será visto a seguir.

3.A TRAJETÓRIA DOS SEMICONDUTORES

Semicondutores conviveram durante muito tempo com válvulas, mas foi somente com a descoberta do transistor que acabou provendo um salto tecnológico no campo da eletrônica. Se por um lado foi um salto incremental em nível de material, por outro acabou sendo disruptivo no fluxo econômico, causando uma revolução sem precedentes. Uma breve revisão desta trajetória é exposta nesta seção.

3.1 Semicondutores e diodos

A matéria pode ser subdividida em porções cada vez menores. Destas divisões, chega-se ao átomo que, de acordo com o experimento realizado em 1911 por Ernest Rutherford, é composto pelas regiões do núcleo e da eletrosfera. Neste modelo, o núcleo tem os elétrons, com carga negativa, orbitando em sua volta. É, também, composto por prótons com carga neutra e os nêutrons sem nenhuma carga. Os elétrons estão divididos em níveis de energia que, de acordo com o tipo de elemento, podem chegar a 7 camadas. (Politi, 1989).

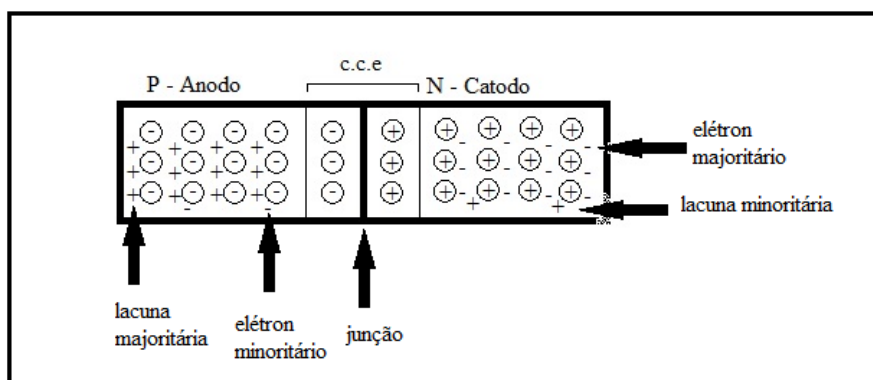
Os semicondutores têm 4 elétrons na sua última camada (de valência) e, por ligação covalente nesta, podem formar uma estrutura cristalina que permite atingir estabilidade com 8 elétrons. Para que haja condução é necessário aplicar alguma energia suficiente no intuito de romper tal ligação, seja luz, calor etc.. Após o rompimento, no material semicondutor, formam-se lacunas. Estas são espaços vazios que permitem a circulação do elétron em direção a um polo positivo de bateria. A lacuna comporta-se como uma carga positiva e pode mover de um lado para outro no cristal. (Cipelli e Sandrini, 1989).

Além do meio energético, existe a possibilidade de utilizar o método de “dopagem” para rompimento. Este constitui em inserir uma pequena quantidade de impureza na estrutura cristalina que pode ser um elemento trivalente (3 elétrons na última camada) ou pentavalente

(5 elétrons na sua última camada). À estrutura criada com elementos semicondutores e trivalentes, devido à criação de lacunas, dá-se o nome de substância tipo P. Já a construída com elementos semicondutores e pentavalentes, devido ao excesso de elétrons livres, dá-se o nome de substância tipo N.

Da união das estruturas P e N cria-se uma junção P.N., conhecida por diodo de junção. No elemento P, chamado por anodo (A), haverá lacunas portadoras majoritárias de carga. Analogamente, no elemento N, chamado por catodo (K), os elétrons serão portadores majoritários. Ambas as substâncias possuem portadores minoritários. Já a região em que ocorre a junção, forma uma camada de carga espacial (c.c.e.), ou seja, ocorre uma recombinação entre portadores majoritários que determinam uma barreira de potencial, pois foi criada estabilidade em suas camadas de valência. Esta barreira de potencial é quebrada quando submetida a 0,3 volts (v) no semiconductor germânio e 0,6 v no silício, chamada também por tensão de ruptura (Cipelli e Sandrini, 1989). A figura 1 ilustra a junção P.N.

Figura 1 - Junção P.N.



Fonte: Cipelli e Sandrini (1982), adaptado.

Dada esta distinção do diodo de se poder trabalhar com lacunas e elétrons, outra forma de inovação incremental e impactante permitiu um avanço nos estudos de semicondutores, a criação do transistor, analisado na próxima subseção.

3.2 Transistores

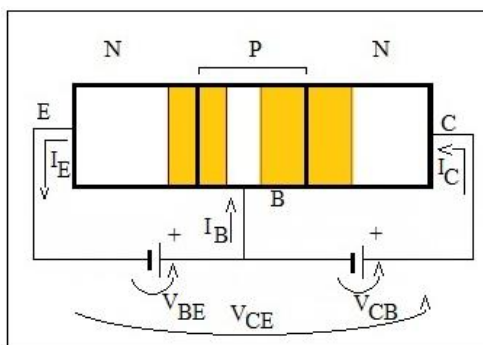
Sabia-se que os semicondutores tinham propriedades interessantes, como a retificação. Contudo, o conhecimento mais aprofundado de válvulas retificadoras fez com que estas últimas predominassem no mercado. O problema é que para determinadas frequências elevadas, estas não apresentavam bom desempenho. Por consequência, durante a década de 1930, várias pesquisas voltaram-se novamente aos semicondutores (Nelson, 2014).

Era de conhecimento que válvulas retificadoras também amplificavam. Por uma questão lógica, os semicondutores possivelmente poderiam amplificar. Disto resultou a formação de um grupo de pesquisas liderado por William Shockley, em 1946, que possuía especial interesse nos estudos deste material. O grupo foi criado sob a tutela e os investimentos dos laboratórios da Bell Telephone, cujos proprietários eram a empresa AT&T, detentora de quase todo o sistema de telefonia americana, e a Western Electric, que produzia para a AT&T (Nelson, 2014). Formou-se uma força-tarefa que era baseada fortemente em pesquisa básica.

A combinação dos materiais e a configuração eletrônica das junções P e N que permitiram a amplificação ocorrerem, quase que acidentalmente, em finais de 1947 (Nelson, 2014; Dosi, 2006) dando origem ao transistor. De acordo com Nelson (2014) as pesquisas iniciais não se basearam em um artefato especial e não se objetivava especificamente a amplificação, mas sim que esta poderia ser um dos consequentes benefícios dentre vários. Além disso, o sucesso não foi decorrente apenas do grupo de pesquisas formado, mas também às outras melhorias ocorridas ao longo do tempo nos sistemas produtivos e manuseios de material, dos quais se destaca o setor de metalurgia da própria Bell.

O grande segredo do dispositivo descoberto foi saber trabalhar com os portadores minoritários (Nelson, 2014). Este é um semicondutor de junção P ou N que tem, em sua região intermediária, outra junção com polaridade oposta, qualificando-o como do tipo NPN ou PNP. Da mesma maneira que o diodo, possui barreira de potencial em cada junção, mas apresenta três terminais: coletor (C), emissor (E) e base (B). Cada terminal tem sua corrente, a qual pode ser designada por: I_E = corrente de emissor, I_C = corrente de coletor e I_B = corrente de base. Contudo, entre um terminal e outro existem diferenças de potenciais que podem ser definidas como: V_{BE} = Tensão base-emissor, V_{CB} = Tensão coletor-base, V_{EB} = Tensão emissor-base, V_{BC} = Tensão base-coletor, V_{CE} = Tensão coletor-emissor, V_{EC} = Tensão emissor-coletor (Cipelli e Sandrini, 1989).

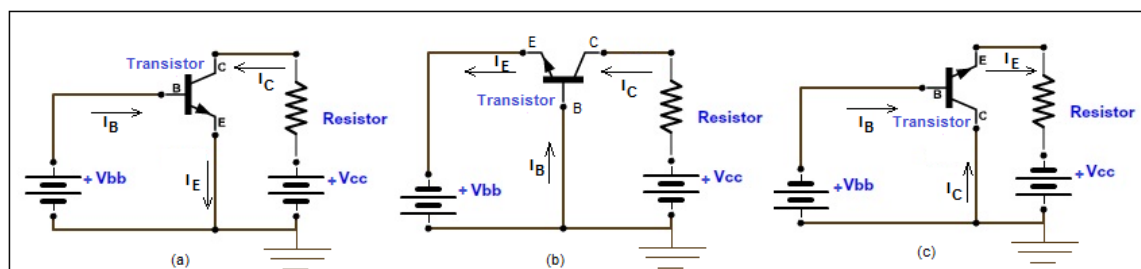
Figura 2 - Junção NPN



Fonte: Cipelli e Sandrini (1989), adaptado.

Um exemplo de amplificação ou ganho pode ser observado nos circuitos da figura 3, com o transistor NPN. Sejam (a) a configuração Emissor Comum, (b) Base Comum e (c) Coletor Comum os Ganhos (amplificação) podem ser analisados na tabela 1.

Figura 3 - Configurações de transistor NPN



Fonte: Cipelli e Sandrini (1989), adaptado.

Tabela 1 - Ganhos de corrente e tensão nas configurações (a), (b) e (c)

CONFIGURAÇÃO	Ganho de Corrente	Ganho de Tensão
Emissor Comum (a)	Elevado	Elevado
Base Comum (b)	< 1	Elevado
Coletor Comum (c)	Elevado	≈ 1

Fonte: Cipelli e Sandrini (1989), adaptado.

A invenção do transístor como amplificador não veio isoladamente. No processo de pesquisa, outros dispositivos foram descobertos ou aprimorados. Mais para frente, outras inovações incrementais foram aparecendo no manuseio dos materiais semicondutores tanto na forma de combinações, quanto na forma de processos de produção, no estilo de Schumpeter (1988).

No que tange à pesquisa, o parecer de Nelson (2014) é que o transístor poderia ter sido desenvolvido em um laboratório industrial menor ou em uma universidade, mas um grande laboratório industrial como o da Bell tinha enorme vantagem comparativa. Já em termos de aspectos econômicos, o transístor conviveu com a válvula durante um bom tempo, pois estas se aperfeiçoaram, uma vez que encontrou um rival à altura, como faz parte de um ciclo de inovação. Além disso, a descoberta também induziu um aumento do número de estudantes graduados e pós-graduados em física do estado sólido, pois novas perspectivas de empregos e renda se abriram.

3.3 Após os Transistores

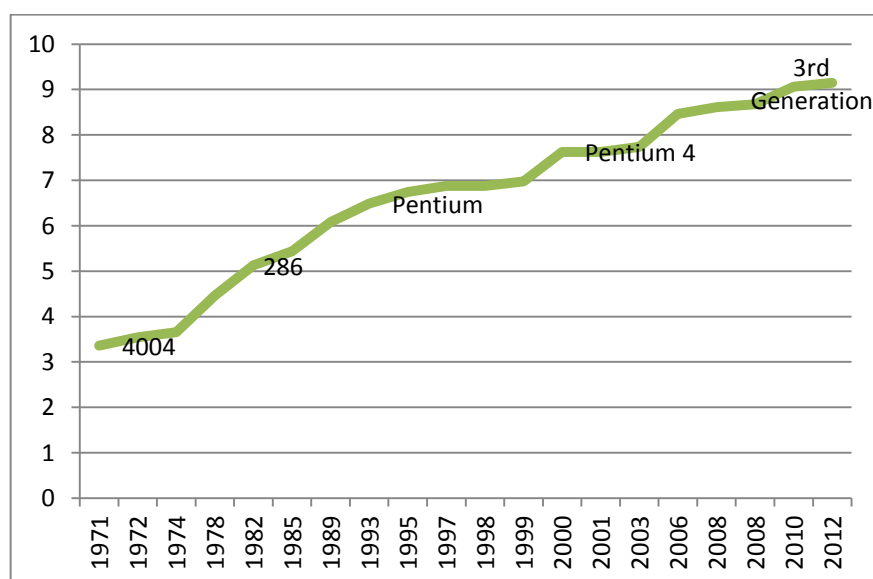
A mudança técnica ainda continuava em um ritmo acelerado durante as décadas de 1960-1970 e várias empresas, além da Bell, obtinham consideráveis receitas. Muitas destas eram provenientes de encomendas, no início, do governo, que reduzia a componente incerteza, e dava certa margem de segurança para as empresas americanas (Freeman e Soete, 2014). Após a oficialização da invenção do transístor, as pesquisas básicas continuaram sendo lideradas, nos EUA, pelos laboratórios da Bell até a década de 1960 e a partir de então, pela IBM até a década de 1970. A descoberta do artefato pressionou diversos campos do conhecimento e, ao mesmo tempo, foi moldado pelo desenvolvimento de outras tecnologias. (Dosi, 2006)

É nesta trajetória tecnológica que inovações incrementais e recombinações foram se acentuando e, ao mesmo tempo, arrastando atrás de si uma onda de novos produtos originários de semicondutores. Destacam-se nesta onda a criação do Circuito Integrado (CI) pelas empresas Texas Instruments e Fairchild, em 1960-61, o Diodo Emissor de Luz (LED) pela Texas Instrument, em 1964, o Microprocessador pela Intel, em 1971-72 e o Microcomputador 8048 pela Intel em 1977, dentre inumeráveis outros. Paralelamente,

diversos outros componentes eletrônicos também foram se aperfeiçoando como os capacitores e resistores, além de processos produtivos.

Além disso, de acordo com Dosi (2006), a mudança técnica leva a um progresso cujas direções são a miniaturização dos componentes, aumento de velocidade, aumento de confiabilidade e custos decrescentes. É neste sentido, no quesito de produção de CIs, embora controverso, que Moore (1965), então presidente da Intel, declarou que a quantidade de transistores, a um mesmo custo, dobraria a aproximadamente 2 anos. De fato, a Intel levava a sério tal premissa, seus microprocessadores ultrapassaram a ordem de 1,4 bilhões de transistores por unidade. A evolução de seus principais *chips* comercializados, em termos de quantidade de transistores, em escala logarítmica, pode ser vista no gráfico da figura 4.

Figura 4 - Gráfico com a quantidade de transistores, em escala logarítmica dos principais processadores Intel, ao longo do tempo



Fonte: Elaboração própria a partir de informações contidas na página da Intel, disponível em <https://www.intel.com.br>, acesso em 17/06/2017.

E é a partir dessa quantidade gigantesca de transistores por *chip* que os semicondutores, definitivamente, mudariam não apenas a trajetória da indústria eletrônica, mas também a de informática e, conseqüentemente, a vida econômica, conforme se verá a seguir.

3.4 Impactos na Contemporaneidade

Antes do advento da eletrônica, houve sempre a busca da facilidade do ser humano em computar e armazenar informações, sobretudo quando em grande quantidade, de maneira mais prática. Desde a época do pastor que armazenava pedrinhas para contabilizar suas ovelhas, às máquinas de Pascal e Babbage, passando pelo ábaco, o princípio de funcionamento era o mecânico.

Nelson (2014) observa que o primeiro computador eletrônico digital plenamente operacional foi o Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC), construído na Escola de Engenharia Elétrica da Universidade da Pensilvânia nos anos de 1943 a 1946. Porém, conforme Caruso Neto e Morais (1991), os computadores ficaram mais rápidos, mais confiáveis e menores quando suas válvulas foram substituídas pelo transístores.

Com o passar do tempo e a larga utilização de *chip* houve um aumento substancial na capacidade de processamento dos microprocessadores, maior utilização de memória de semicondutores e formas de armazenamento. Também ocorreu popularização da utilização do computador em redes, sobretudo a Internet. Finalmente, a queda de custos de produção conjugada com ampla difusão computacional e a utilização de aplicativos inteligentes não restringiu a computação apenas ao *hardware* computador propriamente dito.

O desenvolvimento da Tecnologia da Informação, suportado por semicondutores, acarretou um rastro de destruição de vários produtos e processos *à la* Schumpeter (1961), de modo a impactar definitivamente na vida econômica. Indústrias de Máquinas de Escrever, Fonográfica, Fotográfica, Serviços de correios, Telex, Telefonia, *etc.* deixaram de existir ou tiveram de se adaptar bruscamente para sobreviver no mercado. Muitas das que resistiram acabaram por servir a algum público específico, como certas empresas que ainda produzem discos de vinil.

Uma nova geração de produtos dotados de capacidades computacionais acabou por surgir, caso dos celulares, *tablets* e vários outros maquinários e dispositivos acessórios que podem se conectar em rede. Essa ampla difusão de novos equipamentos, bem como sua utilização ocasionaram novas profissões e serviços com demandas até então inexistentes. Um caso notório é o relacionado à segurança, com o aparecimento de novas modalidades criminais. Estas instauraram necessidades inéditas, inclusive institucionais. Mudanças jurídicas e a criação de serviços públicos e privados tiveram de cobrir um vácuo, até então inexistente, cujo intuito seria impedir práticas que acarretassem prejuízos à sociedade.

A mutação tecnológica nos anos iniciais do século XXI ganha velocidade à medida que se avançam as combinações entre *hardware* e *software*, causando impactos diretos no fluxo econômico. Alguns destes progressos incluem as tecnologias de *cloudcomputing* – em que serviços de computação e informação são compartilhados através da rede de Internet; *big data*– são imensas quantidades de dado, estruturados ou não, que impactam nos negócios diários; *Internet of Things* – dispositivos eletrônicos do cotidiano que são conectados à rede; *Redes Neurais Artificiais*– que são técnicas computacionais que “tentam aprender” tal qual o cérebro humano; e outras infinitudes de engenharias.

Todo este observado, recursivamente, lembra o pensamento de Perez (2010) e Freeman e Perez (1988). Dentro de uma estrutura de revolução tecnológica, as relações de inovação acabam se tornando mútuas. Observa-se, por exemplo, que quanto mais se inova em computadores, também se inova nos semicondutores. A difusão também gera padrões de consumo e uso, tal que a aprendizagem dentro de um sistema facilita a aprendizagem do próximo. Também o pensamento de Dosi (2006), pois após a inovação, cada vez mais o mercado ganha importância com o uso destas tecnologias interativas.

O vislumbre de Dosi (2006) de que a trajetória do paradigma tecnológico se assemelha a um cilindro num espaço multidimensional não é inválido se também for levado em consideração as observações de Schumpeter (1988, 1961). Os semicondutores, sobretudo após a invenção dos transístores, foi um processo incremental no nível microscópico, mas disruptivo em um nível macro. Trouxe ondas de inovação, criou e destruiu produtos e processos, alterou o fluxo econômico e continua a seguir uma trajetória de arraste, o qual poucos ficam à margem da mudança. Por fim, cabe complementar que também como se houvesse propriedades magnéticas, o cilindro dos anos parece atrair até mesmo os que relutam em manter distância das novidades tecnológicas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ampla utilização de semicondutores, contemporaneamente, teve início com o estudo de suas propriedades fundamentais químicas e das características do diodo de junção. Posteriormente, com as pesquisas básicas realizadas na Bell Laboratories, foi alcançada a descoberta do transistor. Embora tenha sido numa visão microscópica, um achado incremental, macroscopicamente foi disruptivo. Abriram, assim, sucessivamente, passagens

paramais descobertas e melhorias incrementais do dispositivo levando ao desenvolvimento de *chips*. Estes por sua vez encontraram grande conforto no mercado de computadores que, tendo relações mútuas, fizeram avançar um ao outro, com crescente queda de custos. Concomitantemente, tais tecnologias mudavam o fluxo circular econômico que, no sentido de Schumpeter, destruía e criava produtos e processos, com impactos inclusive institucionais, dados os novos progressos de tecnologias da computação e informação.

Assim, não se rejeita a observação de Dosiem que tal trajetória esteja num espaço multidimensional, arrastando e direcionando produtos, serviços e a própria vida econômica, bem como a análise de Schumpeter, pois resulta em ondas de inovações. A revisão aqui realizada, portanto, apoia as assertivas de que as revoluções paradigmáticas contemporâneas, *a la Dosi* ou tecnoeconômico, no estilo de Perez, são alicerçadas em semicondutores.

REFERÊNCIAS

ABRAMOVITZ, M. (1956). **Resource and output trends in the United States since 1870**. American Economic Review, 46: 1-23.

CARUSO NETO, J. A. & MORAIS, G. A. A. (1991). **Processamento de Dados: Plataforma para os anos 90**. São Paulo: Editora Érica.

CIPELLI, A. M. V. & SANDRINI, W. J. (1989). **Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos**. São Paulo: Editora Érica.

DOSI, G. (2006). **Mudança Técnica e Transformação Industrial: A teoria e uma aplicação à indústria dos Semicondutores**. Campinas: Editora Unicamp.

FREEMAN, C. & SOETE, L. (2014). **A Economia da Inovação Industrial**. Campinas: Editora Unicamp.

FREEMAN, C. & PEREZ, C. (1988). Structural crises of adjustment, business cycles and investment behaviour. In DOSI et al, **Technological Change and Economic Theory**, pp-33-65. London, N.Y.: Pinter Publishers.

NELSON, R. (2014). **As Fontes do Crescimento Econômico**. Campinas: Editora Unicamp.

NELSON, R. & WINTER, S. (2012). **Uma teoria Evolucionária da Mudança Econômica**. Campinas: Editora Unicamp.

PEREZ, C. (2010). Technological revolutions and Techno-economic paradigms. **Cambridge Journal of Economics**, 34: 185-202.

POLITI, E. (1989). **Química: Curso Completo**. São Paulo: Editora Moderna.

PORTAL INTEL (a). **Advancing Moore's Law on 2014**. Disponível em <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/presentation/advancing-moores-law-in-2014-presentation.pdf> . Acesso em 16/06/2017.

_____ (b). **Intel Chips Timeline**. Disponível em <https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/history/history-intel-chips-timeline-poster.html?wapkw=number+of+transistor>. Acesso em 16/06/2017.

ROSENBERG, N. (2006). **Por Dentro da Caixa-Preta: Tecnologia e Economia**. Campinas: Editora Unicamp.

SCHUMPETER, J. (1988). **A Teoria do Desenvolvimento Econômico**. São Paulo: Editora Nova Cultural.

_____, (1961). **Capitalismo, Socialismo e democracia**. Rio de Janeiro: Editora Fundo de Cultura.

SOLOW, R. (1957). Technical change and aggregate production function. **Review of Economics and Statistics**, 39: 312-320.

STOKES, D. (2009). **O quadrante de Pasteur: a ciência básica e a inovação tecnológica**. Campinas: Editora Unicamp.