

Redes de Sensores Submarinas: Produção Científica e Principais Aplicações

Lívio C. Sousa¹, Daniel R. Luna², Vicente A. de Sousa Jr.^{2*}

¹Departamento de Exploração e Produção
Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) – Alto do Rodrigues – RN – Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) – Natal – RN – Brasil

liviosousa@petrobras.com.br, danielro@ufrn.edu.br, vicente.sousa@ufrn.edu.br

Abstract. *In recent years, a growing interest in research has been emerging in the area of submarine communications, given the potential of activities that this environment presents for humanity. The idea of structuring wireless underwater sensors networks has taken space in these studies, in order to enable such activities, embedding flexibility. In this context, the acoustic communications are promising in comparison to those by electromagnetic waves, however, the underwater medium for such a choice proves to be very problematic. This paper presents a prospective analysis of the topic, applying the method of bibliometric research, revealing characteristics such as the distribution of publications over time, as well as the contribution of countries and areas of scientific knowledge in the development of this subject.*

Resumo. *Nos últimos anos, um crescente interesse em pesquisa vem surgindo na área das comunicações submarinas, diante do potencial de atividades que este ambiente apresenta para a humanidade. A ideia de se estruturar redes de sensores submarinas sem fio tem tomado espaço nesses estudos, a fim de viabilizar tais atividades, embutindo flexibilidade. Neste contexto, as comunicações acústicas se mostram promissoras em comparação àquelas por ondas eletromagnéticas, contudo, o meio submarino para tal escolha se manifesta bastante problemático. Este trabalho apresenta uma análise prospectiva do tema, aplicando o método da pesquisa bibliométrica, revelando características como a distribuição de publicações ao longo do tempo, bem como a contribuição de países e áreas do conhecimento científico no desenvolvimento desse assunto.*

1. Introdução

Nas comunicações submarinas, os primeiros estudos surgiram diante da necessidade em prover troca de informações entre submarinos tripulados [Chitre et al. 2008]. Entretanto, com o passar do tempo, outras necessidades vieram à tona, como monitoração e exploração das características desse ambiente. Pelo exposto, pesquisas vem consolidando sistemas comunicações submarinas da mesma forma como aconteceu nas comunicações na superfície. Recentemente, uma área que tem se destacado é a de redes de sensores submarinas ou UWSN (do inglês *UnderWater Sensor Networks*).

Uma rede de sensores submarina consiste em um sistema de comunicação sem fio composto de sensores e/ou veículos submarinos autônomos que interagem entre si

*O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

de maneira coordenada, compartilhando informações, para fins de aquisição de dados e monitoramento [Ranjan and Ranjan 2013]. Dentre suas potenciais aplicações, pode-se citar: supervisão costeira, pesquisa ambiental, exploração de petróleo e outros recursos naturais, monitoramento de água, navegação, prevenção de desastres, além da vigilância militar [Yang et al. 2018].

Entretanto, trabalhos já verificaram que o meio subaquático não é tão facilmente utilizável quando comparado ao meio aéreo para envio de sinais. A onda eletromagnética, conceito fundamental das telecomunicações, é fortemente atenuada na água, com distância de propagação de algumas unidades de metros [Chitre et al. 2008]. Como alternativa, a onda acústica se apresentou como a escolha mais interessante diante da sua baixa atenuação neste cenário, embora sua velocidade seja cerca de três ordens de grandeza menor em comparação com a onda eletromagnética [Ranjan and Ranjan 2013], permitindo que sua distância de propagação atinja alguns quilômetros. Com a aplicação da onda acústica neste ambiente, surge o canal acústico submarino ou UAC (do inglês *Underwater Acoustic Channel*), que também apresenta suas restrições quando confrontado com o canal tradicional via transmissão eletromagnética, a saber [Chitre et al. 2008, Santos et al. 2013, Stojanovic and Preisig 2009, Etter 2014, Burrowes and Khan 2010]:

- Atraso de propagação longo e variável (longo devido à baixa velocidade do som, e variável pela influência da profundidade, temperatura e salinidade na mesma);
- Largura de banda limitada com conseqüente baixas taxas de transmissão;
- Desvanecimento por espalhamento e atenuação;
- Multipercursos (causado pela geometria do cenário submarino);
- Espalhamento em frequência por efeito Doppler (causado pelo movimento relativo característico e inevitável entre transmissor e receptor, bem como por alteração nas características da superfície da água);
- Ruídos diversos classificados em quatro tipos (por turbulência, por atividade marinha, pelos ação dos ventos na superfície e térmico).

Isso evidencia que o canal acústico submarino está sujeito à variabilidade temporal e espacial, sendo considerado como um dos mais adversos meios de comunicação, tornando os estudos das redes de sensores submarinas algo bastante desafiador [Tu et al. 2009].

Diante do exposto, com o intuito de observar o panorama geral deste assunto, a pesquisa bibliométrica se apresenta como uma ferramenta útil para verificar as tendências de esforços da comunidade científica, revelando informações como quais áreas do conhecimento e países estão interessados neste tema, bem como as ramificações preferenciais de linhas de pesquisas. Tal análise pode ser importante para nortear o início de projetos, além de respaldar ou servir de revisão para aqueles já em andamento.

Este trabalho, portanto, visa fazer um levantamento de informações, nos moldes de uma pesquisa bibliométrica, dos estudos em redes de sensores submarinas, e está assim dividido: A Seção 2 aborda as etapas do método de pesquisa e os termos utilizados na busca de informações; A Seção 3 discute os resultados obtidos e observações com base nas configurações da pesquisa; e a Seção 4 apresenta as conclusões e comentários finais.

2. Metodologia

A pesquisa bibliométrica é parte de um método chamado mapa tecnológico ou TRM (do inglês *Technological RoadMap*), que consiste em um estudo sistemático do desenvolvimento científico e tecnológico. O seu grande objetivo é subsidiar o planejamento de

estratégias, destacando vínculos entre os objetivos e os ativos tecnológicos disponíveis [Souza et al. 2018].

O TRM é dividido em três etapas principais: pré-prospectiva, prospectiva e pós-prospectiva [Cardoso et al. 2017]. Na etapa pré-prospectiva é realizado o estudo preliminar sobre o tema, podendo ser caracterizado por buscas aleatórias de informações sobre o assunto, procurando obter uma visão geral do estado da arte e adquirindo informações que podem ser estratégicas para a próxima etapa. Na etapa prospectiva, a estratégia de busca é definida a partir do uso de palavras-chaves (obtidas na etapa anterior), seguindo com a coleta de informações, que são organizadas de maneira a se analisar melhor os resultados, e assim promover a gestão do conhecimento. Na etapa pós-prospectiva acontece a construção do TRM propriamente dito. A pesquisa bibliométrica se encaixa na segunda etapa de elaboração do TRM, como sendo uma forma de análise prospectiva.

Diante do exposto, considerando que as informações apresentadas na Seção 1 caracterizam a primeira etapa do TRM, a pesquisa bibliométrica foi realizada em duas bases de dados de artigos científicos: *Scopus* e *Web of Science* (WoS). As buscas foram baseadas na seguinte expressão: (*underwater* ou UWSN ou UWAN) e (*network* ou *networks*). A escolha das bases de dados se deu pela quantidade significativa de documentos em seus acervos, bem como pelo reconhecimento que tais bancos de documentos representam bem o universo acadêmico. Já a expressão de busca foi escolhida depois da análise dos resultados das buscas preliminares. Por exemplo, ao se utilizar somente a expressão (*underwater* e *network*), trabalhos que não tinham relação com redes submarinas foram citados. Outro exemplo de observação de documentos fora do contexto foi o resultado para a utilização das siglas UAN (do inglês *Underwater Acoustic Network*) e USN (do inglês *Underwater Sensor Network*), que também são referências para o assunto em questão. Tais siglas também são relacionadas aos termos em inglês *Uric Acid Nephropathy*, *Urea-Ammonium Nitrate* e *Urethane Acrylate Non-ionomer*, para a sigla UAN; e *Update Sequence Number*, *Ultrasonic Nebulizer*, *Unilateral Spatial Neglect*, *Ubiquitous Sensor Networks* e nomes de navios como *USNS Mercy*, para a sigla USN. Essas pesquisas preliminares mostraram que as siglas UWSN e UWAN são específicas para *Underwater Sensor Networks* e afins, sendo que a última possui menor número de citações. Por último, a inclusão do termo *networks* se deu para uma maior abrangência de citações nos resultados.

Finalizando, à respeito das configurações de busca, objetivando ter uma visão da evolução do assunto em vários aspectos, foram aplicados 4 (quatro) filtros: 1) quanto ao período; 2) quanto aos países; 3) quanto às áreas do conhecimento das publicações; e 4) quanto às palavras-chave, sendo este último disponível somente pela base *Scopus*.

3. Resultados e discussões

Conforme as configurações apresentadas na Seção 2, os resultados das pesquisas retornaram 8.773 publicações pela base *Scopus* e 5.105 publicações pela base WoS, que foram classificados com relação ao período, país de origem, áreas do conhecimento e palavras-chave nas subseções a seguir. É importante ressaltar que, considerando cada base de dados, os números dos resultados apresentados nessas subseções, com exceção daquela que trata da distribuição quanto ao período, quando somados resultam em um total maior que o apresentado no início deste parágrafo. Isto se deve ao fato que uma mesma publicação pode ter a contribuição de mais de um país ou ser atribuída à mais de uma área do conhecimento, e também, como de costume, possuir mais de uma palavra-chave. Deste modo, ao invés do termo *número de publicações*, foi utilizado o *número de contribuições* na apresentação dos resultados para a análise quanto aos países e áreas do conhecimento. Já para análise quanto

às palavras-chave, o termo *número de citações* foi utilizado.

3.1. Quanto ao período

Os documentos mais antigos datam de 1951 e 1978, respectivamente nas bases *Scopus* e *WoS*. Como pode ser visto na Figura 1, houve um aumento considerável no número de publicações ao longo do tempo desde tais anos iniciais.

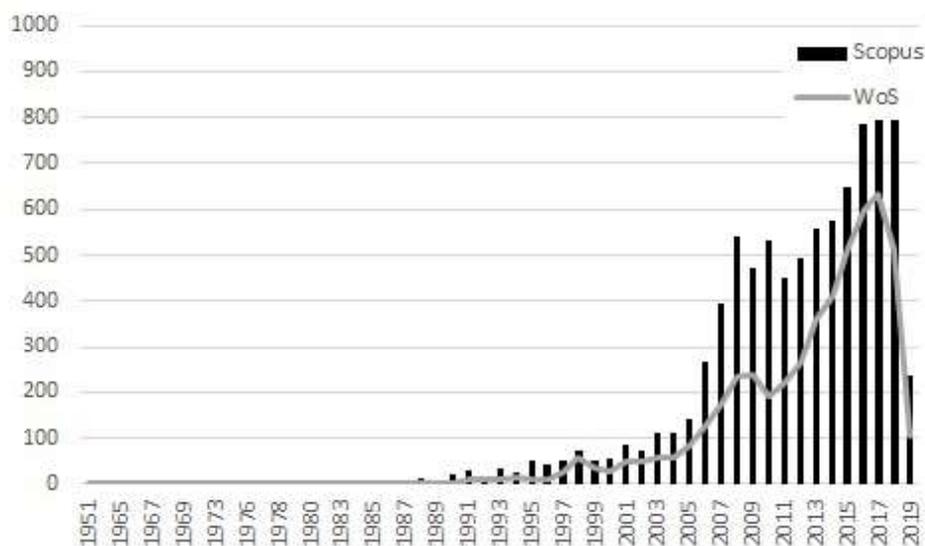


Figura 1. Número de publicações por ano.

É possível perceber também que mais de 80% das publicações se concentram de 2008 até os dias atuais, sendo 80,39% na base *Scopus* e 83,94% na base *WoS*, revelando um aumento exponencial do desenvolvimento científico sobre este assunto na última década. Esses números reforçam que há um crescente interesse da comunidade científica em redes de sensores submarinas.

Para a apresentação dos resultados das próximas subseções, devido a forte concentração de documentos nos anos recentes, os dados foram ordenados e limitados à faixa temporal *de 2008 à atualidade*, representada pelas barras em preto. A faixa temporal secundária *de 2013 à atualidade*, representada pela curva em cinza, foi inserida em paralelo a fim de se observar, individualmente, quão recente ou não é a contribuição de cada item em análise, por meio da diferença entre as amplitudes da barra e da curva associados a cada ponto.

3.2. Quanto aos países

No que se refere aos países, o resultado da pesquisa elencou mais de noventa territórios em ambas as bases. Diante desta quantidade, decidiu-se apresentar os dez primeiros colocados, que correspondem a cerca de 70% em relação ao resultado total. Desta forma, a distribuição feita por gráficos em barra pode ser observada nas Figuras 2 e 3.

Os gráficos mostram o domínio isolado da China seguido pelos Estados Unidos nas pesquisas em UWSN, pois juntos representam mais da metade do número de contribuições, em ambas as bases e faixas temporais. O restante das posições são um pouco diferentes nas duas bases. Por exemplo, a Índia é a terceira colocada na base *Scopus*, entre 2008 e os dias atuais, diferente do que indica a base *WoS*, que elege a Itália para este mesmo período. Entretanto, considerando os anos mais recentes, de 2013 à atualidade, a Índia ultrapassa a Itália na base *WoS*, de modo que ocupa a terceira posição em ambas as bases. Essa mesma

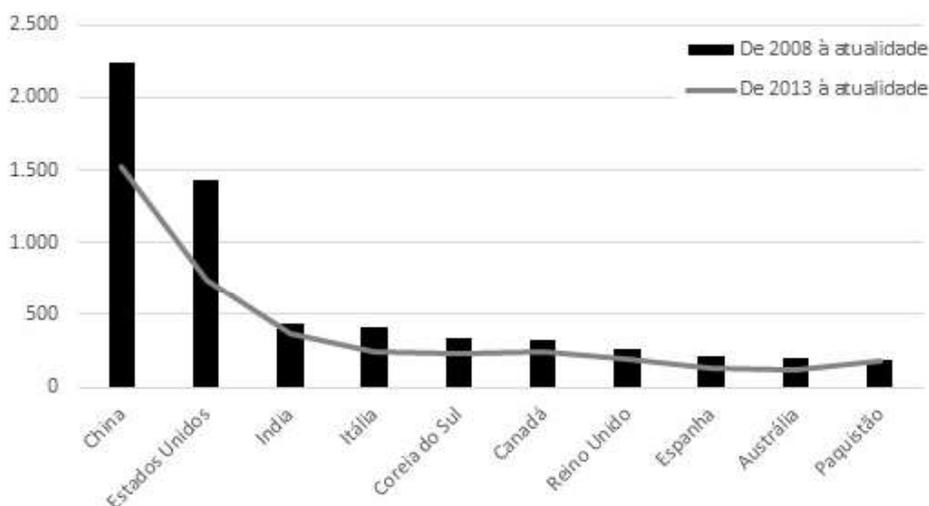


Figura 2. Número de contribuições por países - base Scopus.

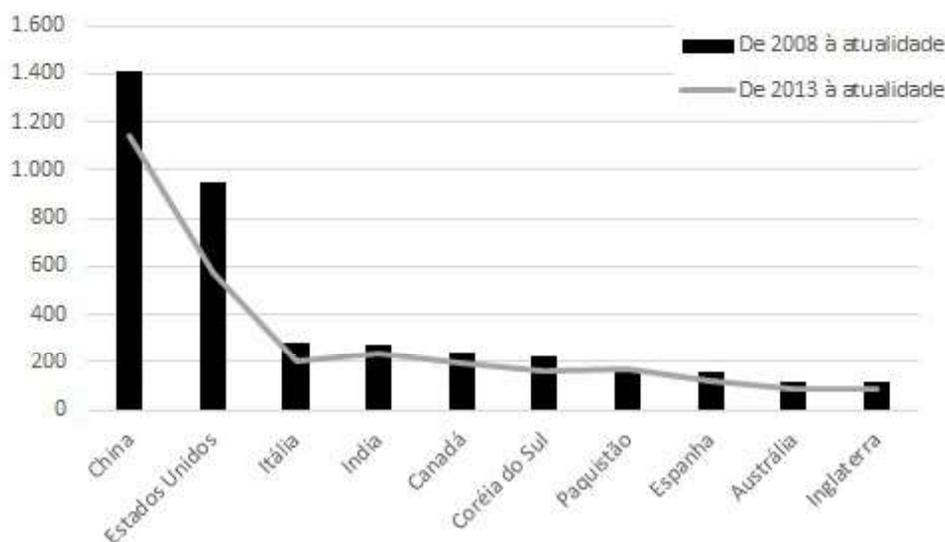


Figura 3. Número de contribuições por países - base WoS.

inversão acontece com a Coreia do Sul e Canadá na base *Scopus*. De maneira geral, em ambas as bases, percebe-se que os mesmos nomes estão na relação dos 10 (dez) países responsáveis pelo maior número de contribuições no assunto.

No que diz respeito à evolução das contribuições próprias de cada país ao longo do tempo, que se reflete na diferença de alturas da barra e da curva, destaca-se, em ambas as bases, que os Estados Unidos possuem a maior diferença, e a Índia e o Paquistão apresentam as menores, revelando certa constância na contribuição deste primeiro país em relação aos últimos os anos.

3.3. Quanto às áreas do conhecimento

Em relação às áreas do conhecimento, como cada base de dados possui uma maneira particular de classificação, não é possível uma comparação clara entre elas. Foi estabelecido a escolha das áreas que correspondem a cerca de 80% do resultado total para cada base de dados, obtendo-se sete áreas para a base *Scopus* e onze áreas para a base *WoS*. Os números de

contribuições por área são apresentados nas Figuras 4 e 5, nos mesmos moldes da subseção anterior.

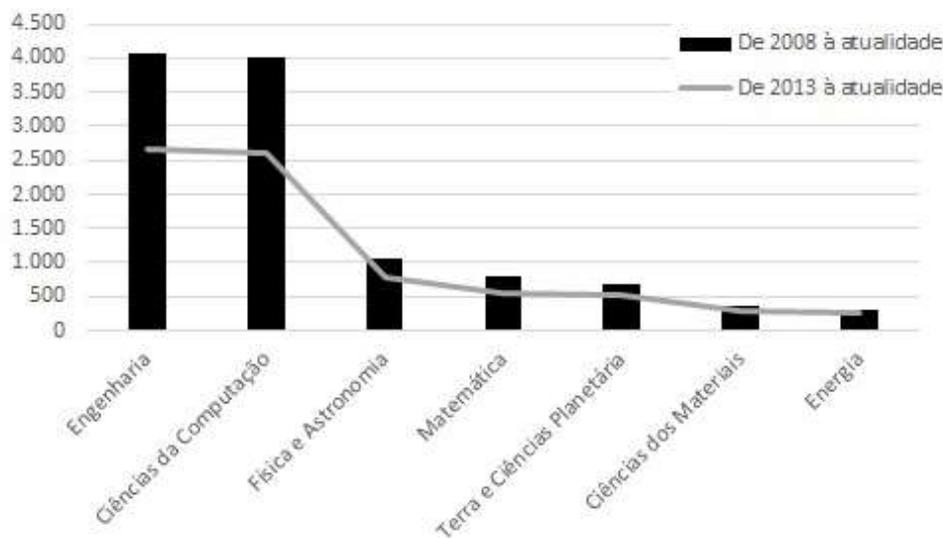


Figura 4. Número de contribuições por área do conhecimento - base Scopus.

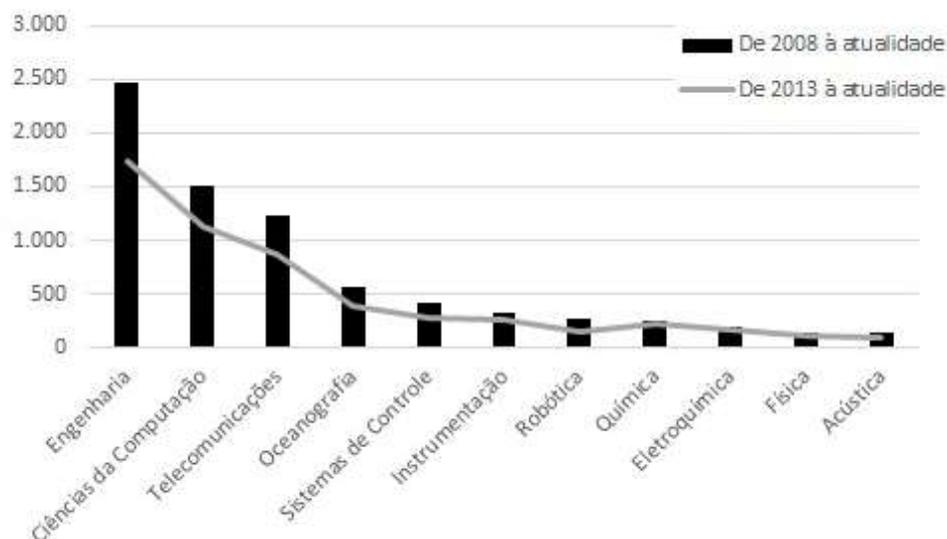


Figura 5. Número de contribuições por área do conhecimento - base WoS.

Apesar da diferença entre as relações de áreas de conhecimento das duas bases de dados, pode-se observar a predominância da Engenharia e Ciências da Computação em ambas as bases e faixas de tempo, sendo responsáveis por mais da metade do número de contribuições. O efeito de inversão de posição de certas áreas entre os períodos só é observado na base WoS, de modo que a Robótica passa de sétima colocada, no período de 2008 à atualidade, para nona colocada, no período mais atual, fazendo com que Química e Eletroquímica avancem duas posições entre as faixas temporais.

Comparando os números de contribuições de cada área do conhecimento entre as faixas temporais, a base Scopus indica as áreas da Engenharia e Ciências da Computação como as que contribuíram de maneira mais distribuída ao longo do tempo, e a área de Energia

como a que evoluiu mais recentemente (via observação do par barra-curva). Entretanto, fazendo a mesma observação proporcional, a base WoS elege a área da Robótica como a que contribuiu de maneira mais espaçada, e a área da Química como a mais neófito, isto é, suas contribuições se concentram praticamente na faixa de 2013 à atualidade. Essa observação, juntamente com o avanço de posição citado no parágrafo anterior, indica um interesse crescente da Química nesse campo de estudo.

3.4. Quanto às Palavras-Chave

Como informado no final da Seção 2, a base *Scopus* possui um filtro que relaciona a quantidade de palavras-chave ao final de um processo de busca. Como um número maior que uma centena foi obtido, e diante de uma distribuição espalhada que revelou que 50% das citações compreendem 25 (vinte e cinco) palavras-chave, decidiu-se apresentar as 10 (dez) mais citadas, conforme pode ser observado na Figura 6¹.

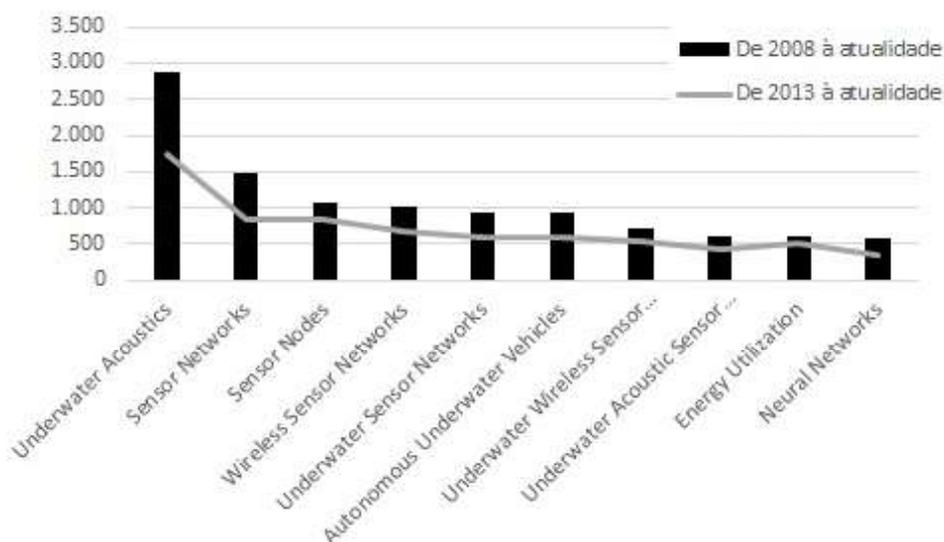


Figura 6. Número de citações por palavra-chave - base *Scopus*.

A palavra-chave *Underwater Acoustics* é a primeira colocada com quase o dobro de citações da segunda colocada, *Sensor Networks*. Percebe-se que, da segunda posição em diante, os números de citações são relativamente próximos, o que pode revelar que não existe um termo preferencial, e que há uma vasta atribuição de locuções de pesquisa no ramo das redes de sensores submarinas.

Assim como nas subseções anteriores, fazendo uma análise da posição das palavras-chave entre as faixas temporais observadas, a única inversão acontece com a palavra-chave *Energy Utilization*, ultrapassando a *Underwater Acoustic Sensor Networks*, o que pode indicar um aumento do interesse no estudo da eficiência energética. Quanto à comparação do número de citações entre as faixas de tempo, é interessante notar que a palavra-chave *Neural Networks* foi a que apresentou maior diferença proporcional, mesmo sendo a última colocada na relação. Por outro lado, a palavra-chave *Energy Utilization* é a que possui citações mais recentes proporcionalmente, o que corrobora para o já mencionado a cerca do interesse deste tópico neste ramo de pesquisa.

¹As reticências presentes no eixo das abscissas refere-se à *Networks*.

4. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi realizar uma pesquisa bibliométrica sobre redes de sensores submarinas (UWSN) para obter uma visão geral da condução que tal ramo de estudo vem tomando. Pelos resultados adquiridos nas bases de dados *Scopus* e *WoS*, pode-se resumir que: 1) houve uma grande e recente dedicação acadêmica nesse estudo, indicada pelo crescimento de publicações na última década, concentrando cerca de 80% do total de todos os anos de registro somente neste breve período; 2) que a China e os Estados Unidos polarizam as contribuições, e conseqüentemente detêm boa parte do conhecimento no assunto, mas que países como Índia e Paquistão vêm mostrando interesse pelo tema; 3) no que se refere às áreas de conhecimento, há uma disputa entre a Engenharia e as Ciências da Computação pela predominância nessa área e; 4) exceto pela palavra-chave *Underwater Acoustic*, líder dentre os termos de referência, existe uma grande variabilidade de palavras-chaves para este objeto, com pesos aproximadamente iguais, mas com destaque para a *Energy Utilization*.

As causas para o panorama apresentado no resumo acima servem como propostas de temas para outros trabalhos investigativos, como por exemplo, por que o interesse da comunidade acadêmica de forma geral, e de determinados países em específico, aconteceu relativamente recente, ou, qual a razão para que áreas relativas à energia estejam crescendo no número de contribuições.

Referências

- Burrowes, G. E. and Khan, J. Y. (2010). Investigation of a short-range underwater acoustic communication channel for mac protocol design. In *2010 4th International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, pages 1–8. IEEE.
- Cardoso, F., Bomtempo, J. V., and Borschiver, S. (2017). Elaboração de roadmap tecnológico para a produção de biogás a partir de vinhaça. *Cadernos de Prospecção*, 10(3):495.
- Chitre, M., Shahabudeen, S., Freitag, L., and Stojanovic, M. (2008). Recent advances in underwater acoustic communications & networking. In *OCEANS 2008*, pages 1–10. IEEE.
- Etter, P. C. (2014). *Underwater acoustic modeling: principles, techniques and applications*. CRC Press.
- Ranjan, A. and Ranjan, A. (2013). Underwater wireless communication network. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3(1):41–46.
- Santoso, T. B., Hendratoro, G., et al. (2013). Development of underwater acoustic communication model: Opportunities and challenges. In *2013 International Conference of Information and Communication Technology (ICoICT)*, pages 358–362. IEEE.
- Souza, L. B., Moura, D. F. C., and Borschiver, S. (2018). Formas de onda e o programa rds-defesa: Proposta e resultados do roadmap tecnológico do lte para aplicações militares. *XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBrT 2018*.
- Stojanovic, M. and Preisig, J. (2009). Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization. *IEEE communications magazine*, 47(1):84–89.
- Tu, K., Fertonani, D., Duman, T. M., and Hursky, P. (2009). Mitigation of intercarrier interference in ofdm systems over underwater acoustic channels. In *OCEANS 2009-EUROPE*, pages 1–6. IEEE.
- Yang, G., Dai, L., and Wei, Z. (2018). Challenges, threats, security issues and new trends of underwater wireless sensor networks. *Sensors*, 18(11):3907.