

**Produção de Nanopartículas de ferritas do tipo espinélio: Um estudo  
bibliométrico**

**Production of nanoparticles of spinel ferrites: A bibliometric study**

**Producción de nanopartículas de ferritas espinela: Un estudio bibliométrico**

Recebido: 23/08/2019 | Revisado: 31/08/2019 | Aceito: 01/09/2019 | Publicado: 20/09/2019

**Jomar José Knaip Ribeiro**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0055-7939>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: [jomarknaip@gmail.com](mailto:jomarknaip@gmail.com)

**Paulo Sérgio da Silva Porto**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6486-7813>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: [pssporto@gmail.com](mailto:pssporto@gmail.com)

**Paulo Sérgio Moscon**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1124-1091>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: [psmoscon@hotmail.com](mailto:psmoscon@hotmail.com)

**José Rafael Cápua Proveti**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8809-9791>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: [proveti@gmail.com](mailto:proveti@gmail.com)

**Marcio Solino Pessoa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6117-8492>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: [msolinofisico@gmail.com](mailto:msolinofisico@gmail.com)

**Rodrigo Dias Pereira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9486-7374>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: [rodrigo.pereira@ufes.br](mailto:rodrigo.pereira@ufes.br)

**Eduardo Perini Muniz**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0500-4786>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

## Resumo

Neste artigo foi realizada uma análise bibliométrica sobre a produção de ferritas do tipo espinélio, visando ampliar a gestão de conhecimentos sobre a área de pesquisa, bem como identificar perspectivas futuras voltadas para as aplicações dessas estruturas e lançar luz à pesquisas sequentes. O estudo foi delineado a partir de uma análise estatística e qualitativa dos documentos da base de dados da *Web of Science* (WoS) no período entre 1995-2017, utilizando como ferramenta adicional o software *CiteSpace*, que permite a ampliação do domínio do conhecimento sobre o tema com a obtenção de um conjunto de registros bibliográficos de publicações relevantes, com subsequente identificação de grupos interligados de pesquisa (clusters). O software *CiteSpace* fornece um grupo de parâmetros empíricos, dentre eles o denominado *Betweenness Centrality* (BC), que descreve a influência de determinado artigo na transferência de informações entre o conjunto de publicações em estudo. Por meio dos resultados foi possível identificar crescimento significativo no número de publicações e citações. Os países com maiores números de publicações são: Índia (946), China (483) e Estados Unidos da América (247), sendo que os EUA detêm o maior parâmetro de centralidade(BC), que reflete o seu papel de destaque na transmissão de informações sobre as ferritas do tipo espinélio. Ao analisar a decomposição das categorias da WoS em grandes grupos ou clusters foi observada a predominância de três áreas de acordo com o número de co-citações: “magnetic properties”, “eletromagnetic properties” e “effective electrocatalysis properties”, que reflete os principais objetivos das pesquisas sobre esse tema. Dentre as principais palavras-chave, “cobalt ferrite” possui o maior parâmetro BC, revelando maior interesse da comunidade científica nas ferritas de Cobalto. Os resultados dos clusters foram corroborados a partir da identificação das principais aplicações das ferritas do tipo espinélio nos últimos dois anos, em que foi observada a atuação desses materiais predominantemente em tratamento de efluentes, dispositivos magnéticos, sensores e aplicações na medicina.

**Palavras-chave:** nanomateriais; magnetismo; CiteSpace; aplicações.

## Abstract

In this article a bibliometric analysis of spinel ferrite production was carried out, with the purpose of to expanding the knowledge management on the research area, also identify future perspectives turned to the application of such structures and light to dry research. The study was designed based on a statistical and qualitative analysis of Web of Science (WoS) database documents from 1995-2017, using as an additional tool the CiteSpace software, which allows the expansion of the domain of knowledge on the

subject With the acquirement of a set of bibliographic records of relevant publications, with subsequent identification of interlinked research groups (clusters). The CiteSpace software provides a set of empirical parameters, among them the so-called Betweenness Centrality (BC), which describes the influence of a given article on the transfer of information between the set of publications under study. Through the results it was possible to identify significant growth in the number of publications and citations. The countries with the highest number of publications are India (946), China (483) and the United States (247), with the US having the largest centrality parameter (BC), which reflects its prominent role in transmitting, information about spinel type ferrite. When analyzing the de-composition of WoS categories in large groups or clusters, we observed the predominance of three areas according to the number of co-citations: magnetic properties, electromagnetic properties and effect had electrocatalysis properties, which reflects the main objectives of research on this topic. Among the main keywords, "cobalt ferrite" has the largest BC parameter, revealing greater interest of the scientific community in Cobalt ferrite. The results of the clusters were corroborated from the identification of the main applications of spinel type ferrite in the last two years, in which the performance of these materials was observed predominantly in effluent treatment, magnetic devices, sensors and medical applications.

**Keywords:** nanomaterials; magnetism; CiteSpace; applications.

## Resumen

En este artículo, se realizó un análisis bibliométrico de la producción de ferrita de espinela, con el objetivo de ampliar la gestión del conocimiento del área de investigación, así como identificar perspectivas futuras sobre la aplicación de estas estructuras y arrojar luz sobre la investigación posterior. El estudio fue diseñado en base a un análisis estadístico y cualitativo de los documentos de la base de datos de Web of Science (WoS) de 1995-2017, utilizando como herramienta adicional el software CiteSpace, que permite la expansión del dominio del conocimiento sobre el tema. como la obtención de un conjunto de registros bibliográficos de publicaciones relevantes, con la identificación posterior de grupos de investigación vinculados (grupos). El software CiteSpace proporciona un conjunto de parámetros empíricos, entre ellos el Betweenness Centrality (BC), que describe la influencia de un artículo determinado en la transferencia de información entre el conjunto de publicaciones en estudio. A través de los resultados fue posible identificar un crecimiento significativo en el número de publicaciones y citas. Los países con el mayor número de publicaciones son India (946), China (483) y Estados Unidos (247), y Estados Unidos tiene el mayor parámetro de centralidad (BC), lo que refleja su papel destacado en la transmisión. información sobre ferrita tipo espinela. Al analizar la descomposición de las categorías de WoS en grandes grupos o grupos, se observó el predominio de tres áreas de acuerdo con el número de co-citas: propiedades magnéticas, propiedades electromagnéticas y propiedades efectivas de electrocatalisis, que reflejan las principales objetivos de investigación sobre este tema. Entre las palabras clave principales, "ferrita de cobalto" tiene el parámetro BC más grande, lo que revela un mayor interés de la comunidad científica en la ferrita de cobalto. Los resultados de los grupos se

corroboraron a partir de la identificación de las principales aplicaciones de ferrita tipo espinela en los últimos dos años, en los que se observó el rendimiento predominante de estos materiales en el tratamiento de aguas residuales, dispositivos magnéticos, sensores y aplicaciones médicas.

**Palabras clave:** Nanomateriales; magnetismo; CiteSpace; aplicaciones.

## 1. Introdução

A nanotecnologia consiste de um campo teórico e experimental de aplicação da ciência e da tecnologia que compreende sistemas em nível molecular que exploram as estruturas dos materiais (Kumar *et al.*, 2012). As nanopartículas são partículas com dimensões inferiores à 1 um até escalas atômicas e moleculares ( $\approx 0,2$  nm), podendo ser encontradas na forma cristalina ou amorfa (Buzea, Pacheco and Robbie, 2007).

O interesse da comunidade científica por materiais nanoestruturados deve-se às suas propriedades físicas distintas, comparativamente aos seus análogos macroscópicos. Enquanto que materiais macroscópicos mantêm suas propriedades físicas invariantes com relação à variações de tamanho e forma, nanomateriais apresentam significativas alterações em suas propriedades como função de “pequenas” variações em suas dimensões e/ou morfologias, possibilitando a obtenção de uma vasta gama de materiais endereçados a aplicações distintas (Zarbin, 2007).

Dentre os nanomateriais, as ferritas nanocristalinas de estrutura do tipo espinélio  $AFe_2O_4$  (A= Co, Zn, Ni, Mg, Mn and etc.) apresentam características que as credenciam para aplicações que visam solucionar diversos problemas na indústria (Jung, Lee and Lee, 2017). Em especial, as propriedades magnéticas e catalíticas dessas estruturas dependem da distribuição dos cátions ao longo dos sítios nas células unitárias (Abbas *et al.*, 2011; Sivakumar *et al.*, 2011; Manikandan *et al.*, 2014).

Neste contexto, estudos bibliométricos são ferramentas importantes para identificar produções científicas e tendências de pesquisas por meio de análises estatísticas que identificam os principais países, autores, periódicos e outras características extraídas dos documentos de determinado campo (Li, 2017; Zhu and Hua, 2017; Hou, Yang and Chen, 2018). Comumente, estas avaliações são realizadas por meio da análise de clusters, em que combina-se palavras-chave, categorias, frequência de documentos e autores (Zheng, Fu and Ho, 2017). Neste artigo foi desenvolvida uma análise bibliométrica afim de ampliar a gestão de conhecimentos sobre as ferritas do tipo espinélio, traçando as características gerais sobre os trabalhos, identificando as perspectivas futuras para aplicações desses materiais e lançando luz à pesquisas sequentes.

## 2. Metodologia

Os resultados foram obtidos através da base de dados da *Web of Science*<sup>®</sup> em 20 de Julho de 2018. As palavras-chave utilizadas no estudo foram “Ferrite”, “Spinel” and “Nanoparticles” com os resultados obtidos a partir da limitação temporal de 1995 à 2017. O estudo foi realizado a partir de 3003 trabalhos publicados, com os termos de pesquisa. Os dados foram organizados segundo o número de publicações, citações, principais fontes de publicação e os países de origem. O fator de impacto publicado em 2017 (IF<sub>2017</sub>) foi obtido do Journals Citation Reports (JCR), sendo analisados para as vinte revistas com maior número de publicações e citações.

Para a análise bibliométrica foi utilizado o CiteSpace<sup>®</sup> versão 5.0, um software livre no JAVA ([http:// Cluster. CIs. Drexel. edu/\\* Cchen/Citespace](http://Cluster.CIs.Drexel.edu/*Cchen/Citespace)) desenvolvido por Chaomei Chen at Drexel University (USA) (Chen, 2005, 2017), que permite identificar no conjunto de dados a frequência dos autores, as fontes de publicação mais citadas, os países de origem e as principais palavras-chave, a partir do conjunto de dados da WoS. Adicionalmente foi mensurado o parâmetro “Betweenness Centrality” ou parâmetro de centralidade (BC) com pontuações normalizadas no intervalo [0,1], determinando a influência dos nós (que podem ser o número de citações, países, periódicos, palavras-chave ou categorias da WoS) na transferência de itens através das redes das pesquisas; trata-se portanto, de um indicador útil de grupos ou clusters interligados, pois um nó com alto BC liga dois ou mais grandes grupos de nós (Chen, 2005; Zhu and Hua, 2017). Analisou-se também os clusters e o tamanho dos nós que são proporcionais ao número de co-citações associadas às Categorias da WoS (Zheng, Fu and Ho, 2017).

## 3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Análise contextual da produção científica na amostra

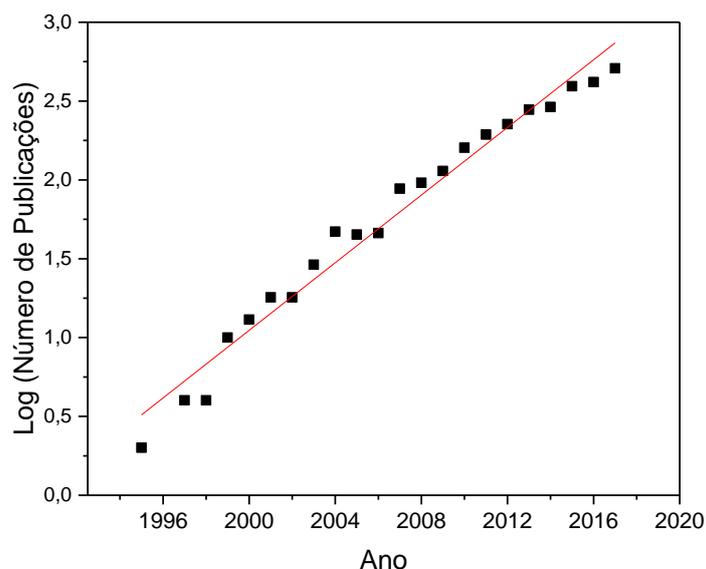
A Tabela 1 apresenta uma estimativa da evolução das pesquisas sobre as estruturas de ferritas do tipo espinélio, com o número 3003 trabalhos publicados no período de 1995-2017. O número total de trabalhos publicados por ano (TP) e as suas respectivas porcentagens (TP %) foram sumarizadas na Tabela 1. Através dos resultados das publicações por ano, evidencia-se

o aumento constante de trabalhos no período em estudo, apresentando comportamento crescente, de 2 em 1995 para 510 em 2017, o que pode ser inferido ainda, que a gestão de conhecimento sobre estas estruturas cresce, e por consequência também o interesse dos pesquisadores em sua evolução. O crescimento do número de publicações foi ajustado por um modelo linear com coeficiente de determinação  $R^2 = 0.97234$  (Figura 1).

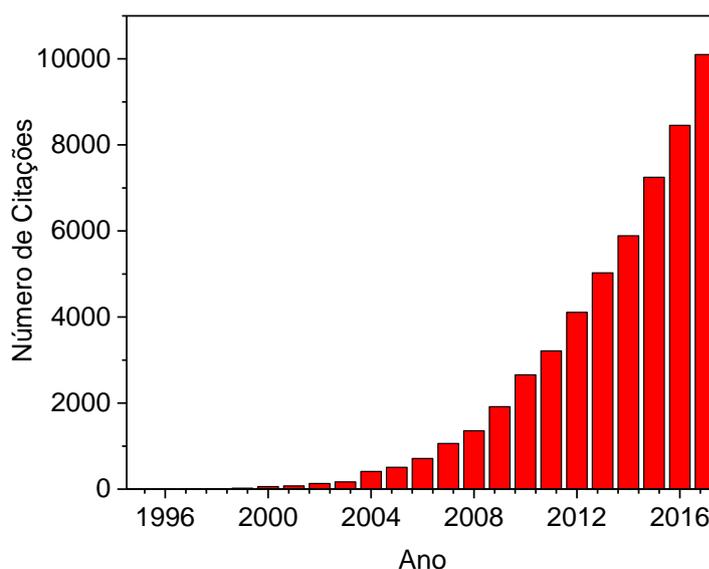
Tabela 1: Evolução dos trabalhos publicados na base de dados da WoS indexadas na base de dados da WoS no período de 1995-2017, com as palavras-chave “ferrite”, “spinel” e nanoparticles”.

Ano	PT	PT %
2017	510	16,983
2016	417	13,886
2015	393	13,087
2014	290	9,657
2013	279	9,291
2012	226	7,526
2011	194	6,46
2010	160	5,328
2009	114	3,796
2008	96	3,197
2007	88	2,93
2006	46	1,532
2005	45	1,499
2004	47	1,565
2003	29	0,966
2002	18	0,599
2001	18	0,599
2000	13	0,433
1999	10	0,333
1998	4	0,133
1997	4	0,133
1995	2	0,067

**Figura 1:** Logarítimo do número de publicações em função do ano; entre 1995 e 2017. Os pontos são dados retirados da WoS e a linha vermelha corresponde a um ajuste linear.



**Figura 2:** Evolução do número de citações indexadas na base de dados da WoS no período de 1995-2017, com as palavras-chave “ferrite”, “spinel” nanoparticles”.



**Fonte:** Web of Science (Jan/2018).

### 3.2. Aplicações, Periódicos e Principais Categorias na WoS

Analisou-se as tendências dos estudos sobre as estruturas do tipo espinélio por meio da identificação das suas aplicações, evidenciadas na literatura nos últimos anos (2016-2017). Estas informações foram sumarizadas na Tabela 2 e diferenciadas em relação ao tipo de material, o periódico e a sua aplicação. Neste estudo, identificou-se predominantemente o uso das ferritas como catalisadores alternativos para tratamento de águas residuais, sensores para

fins de diagnóstico médico e dispositivos magnéticos.

**Tabela 2:** Aplicações das estruturas espinélio (2016-2017).

<b>Estrutura Espinélio</b>	<b>Referências</b>	<b>Aplicação</b>
$MnCr_xFe_{2-x}O_4$	(Baykal <i>et al.</i> , 2016)	Absorvedores de Microondas
$CoFe_2O_4$ /titanatenanotubes	(Du <i>et al.</i> , 2016)	Catalisador para ativação de peroximonossulfato e degradação de poluentes orgânicos
$Mn_xGa_{1-x}Fe_2O_4$	(Sánchez <i>et al.</i> , 2017)	Diagnóstico Médico
$Cu_{0,3}Zn_{0,5}Mg_{0,2}Fe_2O_4$	(Ansari <i>et al.</i> , 2017)	Veículo de entrega de fármacos
$LiNi_{0,5}Pr_xFe_{2-x}O_4$	(Warsi <i>et al.</i> , 2017)	Dispositivos tecnológicos avançados inteligentes
$Sm_x-CoFe_{2-x}O_4$	(Falsafi <i>et al.</i> , 2017)	Sensor de vazamento de hidrogênio
$CoAl_xFe_{2-x}O_4$	(Toksha <i>et al.</i> , 2017)	Aplicações em alta frequência
$Ni_{1+x}Zr_xFe_{2-2x}O_4$	(Dilshad <i>et al.</i> , 2016)	Potenciais aplicações em dispositivos de alta frequência
$CoFe_2O_4$ /SBA-15 silica	(Chen <i>et al.</i> , 2017)	Fotocatálise / azul de metileno
$Al_xCu_yCo_zFe_2O_4$	(Bhujun, Tan and Shanmugam, 2016)	Eletrodos para supercapacitores
$CoFe_2O_4$	(X. Wu <i>et al.</i> , 2016)	Pseudocapacitores e outras aplicações eletroquímicas
$MnFe_2O_4$	(Kwon <i>et al.</i> , 2017)	Aplicações eletroquímicas
$Cu_{1-x}Mn_xFe_2O_4$	(Velinov <i>et al.</i> , 2017)	Catalisadores para reação de troca de gás-água e decomposição de metanol
$NiFe_2O_4$	(Domínguez-Arvizu <i>et al.</i> , 2017)	Avaliação fotocatalítica para produção de hidrogênio
$ZnFe_2O_4$ / graphene	(Navadeepthy <i>et al.</i> , 2017)	Sensores catalíticos baseados em peroxidase intrínseca de $H_2O_2$

MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Co, Ni e Zn)	(Dehghani, Hashemian and Shibani, 2017)	Adsorção de vermelho de bromofenol
Mn <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Jesudoss <i>et al.</i> , 2016)	Fotodegradação corante sintético índigo-carmine atividade antibacteriana
MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Co, Ca, Cu, Co-Zn, Mn-Zn, Ni e Zn)	(Praveen Kumar <i>et al.</i> , 2017)	Decontamination of sulfur mustard
MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Co, Cu, Mn, Fe e Zn)	(Dhand <i>et al.</i> , 2017)	Atividade catalítica durante a deposição de vapor químico de nanocarbonos polimórficos
MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Cu, Ni e Zn)	(Shetty <i>et al.</i> , 2017)	Fotocatálise / Verde Malaquita
MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Co, Mn e Zn)	(Ibrahim <i>et al.</i> , 2016)	Performance catalítica para redução de nitroarenos
Co <sub>0,6</sub> Zn <sub>0,4</sub> Cu <sub>0,2</sub> M <sub>x</sub> Fe <sub>1,8-x</sub> O <sub>4</sub> (x=0,2, 0,4, 0,6 and 0,8)	(Bhukal <i>et al.</i> , 2016)	Fotocatálise / laranja de metila
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Choi <i>et al.</i> , 2017)	Precursor Catalisador para a Síntese Seletiva de Combustíveis Líquidos de Hidrocarbonetos
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(J. Wu <i>et al.</i> , 2016) (Ayesh <i>et al.</i> , 2017; Haija <i>et al.</i> , 2017)	Sensor para H <sub>2</sub> S
Chitosan-Coated/ ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Ignat <i>et al.</i> , 2016)	Adsorção Cr (III) e Ni (II) de soluções aquosas
Zr <sub>x</sub> Co <sub>0,8-x</sub> Ni <sub>0,2-x</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /graphene	(Rasheed <i>et al.</i> , 2016)	Material anódico para aplicações de bateria de lítio
MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /MoS <sub>2</sub> MnCoFeO <sub>4</sub>	(Narsimulu <i>et al.</i> , 2016) (Zhao <i>et al.</i> , 2017) (Elkholy, El-Taib Heakal and Allam, 2017)	Supercapacitores
MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Basiri and Taei, 2017)	Determinação eletroquímica simultânea diclofenaco e morfina
MnFe <sub>2-x</sub> Sm <sub>x</sub> O <sub>4</sub>	(Shankar K. Rashmi <i>et al.</i> , 2017)	Fotocatálise / Rosa Bengala
CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Nakhate and Yadav, 2017)	Catalisador para N-arilação de Indole e Imidazole com Haleto de Arilo

CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Srivastava, Kohout and Sillanpää, 2016)	Remediação de cromo hexavalente de águas residuais sintéticas e de impressão
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> e MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Tan <i>et al.</i> , 2017)	Catalisador heterogêneo de peroximonossulfato para a degradação do paracetamol
CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Sharma and Shah, 2016)	Biossensor
ZnSm <sub>x</sub> Fe <sub>2-x</sub> O <sub>4</sub>	(S. K. Rashmi <i>et al.</i> , 2017)	Fotocatálise / laranja de metila
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Patil <i>et al.</i> , 2016)	Sensores de umidade relativa
SnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Bindu <i>et al.</i> , 2016)	Sensor potenciométrico não enzimático de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e aplicações de supercapacitores
MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Co, Ni e Fe)	(Jaime-González <i>et al.</i> , 2016)	Redução catalítica de peróxido de hidrogênio
MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (Zn e Ni)	(Kovalenko <i>et al.</i> , 2016)	Aumento da eficiência de células solares de heterojunção
ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Hoque <i>et al.</i> , 2016)	Aplicações Biomédicas
Co <sub>1-x</sub> Mg <sub>x</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Sundararajan <i>et al.</i> , 2017)	Degradação da Rodamina B
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Peng <i>et al.</i> , 2017)	Microbial fuel cell
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , NiCe <sub>0,1</sub> Fe <sub>1,9</sub> O <sub>4</sub> e NiCe <sub>0,5</sub> Fe <sub>1,5</sub> O <sub>4</sub>	(Subbiah <i>et al.</i> , 2017)	Sensor de corrosão do aço no concreto
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Žalneravičius <i>et al.</i> , 2016)	Atividade antimicrobiana
Review	(Hyder and Manjura Hoque, 2017)	Diagnóstico e terapêutica do tumor cerebral
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Chamoumi and Abatzoglou, 2016)	Catálise para reforma seca
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> - hematoporphyrin-folicacid	(Choi <i>et al.</i> , 2016)	Atividade anticancerígena fotodinâmica
Zn <sub>x</sub> Co <sub>1-x</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Hammad, Nica and Hempelmann, 2017)	Aplicações de hipertermia
Mn <sub>x</sub> Zn <sub>1-x</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /graphene	(Rahman <i>et al.</i> , 2016)	Compatibilidade com antena patch
MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub> -NH <sub>2</sub> e MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub>	(Reddy <i>et al.</i> , 2017)	Recuperação de Pt (IV) de soluções ácidas
MgFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	(Thanigai Arul <i>et al.</i> , 2016)	Sensor de gás para álcool
CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /composite	(He, Dai and Zhou, 2017)	Catalisador para oxidação fotocatalítica de carbamazepina

Considerando o número de ocorrências, destaca-se as aplicações no tratamento de águas contaminadas por corantes. Nesse contexto Reddy e Yun (2016) reportam que o aumento da capacidade de adsorção de corantes pode ser obtido através da funcionalização - recobrimento controlado das superfícies - das ferritas nanoparticuladas, em especial com a formação de compósitos com carvão ativado, resultando em uma superfície polar seletiva para compostos orgânicos.

Para as estruturas sem nenhum tipo de funcionalização, observa-se também grande potencialidade para remoção dos corantes. Como observado no estudo dos autores Padmapriya et al. (2016) no qual avaliaram a eficiência da estrutura espinélio mista de  $Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$  ( $0.0 \leq x \leq 1.0$ ) na degradação fotocatalítica (DFC) do azul de metileno. Observaram que a dopagem com Ni promoveu maior remoção do corante, apresentando como ponto máximo de DFC a amostra  $Ni_{0,6}Zn_{0,4}Fe_2O_4$  ( $x=0,6$ ), com uma porcentagem de degradação de 94%. Alguns trabalhos comparam diferentes tipos de estruturas cristalinas do tipo espinélio, como no estudo de Dehghani, Hashemian e Shibanino qual avaliam três materiais para remoção do corante vermelho de bromofenol  $MFe_2O_4$  ( $M = Co, Ni$  e  $Zn$ ). Os resultados mostraram que a capacidade de adsorção das nanopartículas foi  $ZnFe_2O_4, CoFe_2O_4$  e  $NiFe_2O_4$ , com adsorção de 95, 85 e 75% respectivamente. Os autores obtiveram valores negativos de energia de Gibbs o que indica que o processo de adsorção do corante nos espinélios de ferrita é espontâneo.

No trabalho de Jesudoss et al. (2016) foi produzido nanocristais de  $Mn_{1-x}Ni_xFe_2O_4$  ( $x = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$  e  $0.5$ ) visando a avaliação da degradação do corante sintético de índigo-carmim. Dentre os principais resultados, observaram que a estrutura  $Mn_{0,5}Ni_{0,5}Fe_2O_4$  apresentou o maior desempenho de DFC com 96% (180 min), bem como como a obtenção de parâmetros ótimos do processo como a dosagem do catalisador de 50 mg /100 mL, a concentração do corante em 150 mg / L e o pH ácido.

Com auxílio do software CiteSpace, foi obtida uma rede de clusters que interliga diversos nós e analisou-se a associação entre as categorias da WoS com o número de co-citações na amostra em estudo. Nessa análise observa-se os principais grupos proeminentes de pesquisa, com um conjunto de 13 clusters. Os grupos associados à #0 magnetic properties, #2 eletromagnetic properties e #5 effective electrocatalysis properties receberam maior atenção dos pesquisadores, evidenciado pelo tamanho dos nós desses clusters, que são proporcionais às frequências totais de co-citação dos trabalhos correspondentes (Zheng, Fu and Ho, 2017).

Estes resultados corroboram com os resultados obtidos nos trabalhos publicados entre 2016-2017, acerca dos principais estudos e aplicações desses materiais, que são relacionadas as

suas propriedades magnéticas e catalíticas. O ano médio de ocorrência desses clusters mostra que os trabalhos que os compõem são mais antigos, publicados entre 1995-2001. A importância da caracterização magnética dos nanomateriais é evidenciada pelos clusters #0 *magnetic properties* e #2 *electromagnetic properties*. O cluster #5 (*effective electrocatalysis properties*), evidencia a relevância dos trabalhos voltados para aplicação em processos de catálise, sendo aplicadas, por exemplo, na oxidação do álcool benzílico (Yan *et al.*, 2013; Manikandan *et al.*, 2014), degradação do azul de metileno (Lassoued *et al.*, 2018) e redução de compostos nitroaromáticos (Goyal *et al.*, 2014).

Para a análise das categorias em que os trabalhos estão inseridos na WoS, obteve-se um conjunto de 70 categorias. Ressalta-se que os artigos podem ser classificados em uma ou mais categorias de acordo com o periódico de origem. Na Tabela 3 visualiza-se as 20 principais categorias segundo o número de publicações. Os periódicos *Physics Condensed Matter*, *Physics Applied Chemistry Physical* possuem maiores números de publicações com 878, 735 e 557 e parâmetros BC de 0,09, 0,14 e 0,22, respectivamente.

**Tabela 3:** 20 principais categorias da Web of Science.

Contagem	BC	Ano de início	CategoriesWoS
878	0,09	1995	<i>Physics Condensed Matter</i>
735	0,14	1998	<i>Physics, Applied</i>
557	0,22	1997	<i>Chemistry, Physical</i>
343	0,11	2001	<i>Science &amp; technology – other topics</i>
313	0,35	2001	<i>Nanoscience &amp; Nanotechnology</i>
307	0,07	1997	<i>Chemistry, Multidisciplinary</i>
287	0,33	2001	<i>Engineering</i>
265	0,05	2002	<i>Materials Science, Ceramics</i>
262	0,17	2001	<i>Metallurgy &amp; Metallurgical Engineering</i>
173	0,22	2001	<i>Engineering, Electrical &amp; Electronic</i>
92	0,01	1995	<i>Physics, Multidisciplinary</i>
75	0,24	2006	<i>Engineering Chemical</i>
74	0,01	2002	<i>Chemistry, Inorganic &amp; Nuclear</i>
53	0,1	2007	<i>Chemistry, Analytical</i>
52	0,02	2003	<i>Physics, Atomic, Molecular &amp; Chemical</i>
42	0,01	2001	<i>Optics</i>

**Fonte:** Elaborado pelos autores e baseado em dados da Web of Science e CiteSpace.

A Tabela 4 relaciona os vinte periódicos mais citados, com seus respectivos fatores de impacto, parâmetro BC e o ano inicial em que houve citação no período estudado. O periódico *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* detêm a maior frequência de citações (2571) e

apresenta o maior BC (0,08), refletindo a predominância desse periódico na história da pesquisa sobre as ferritas do tipo espinélio. O periódico *Journal of Applied Physics* apresenta o segundo maior número de citações (1813) com BC de 0,02, igual ao vigésimo periódico *Journal of the American Ceramic Society* com 678 trabalhos, o que sugere a sua menor predominância e impacto nos níveis histórico de pesquisa.

**Tabela 4:** 20 principais periódicos altamente citados.

Fonte de Publicação	Contagens	Centralidade	IF <sub>2017</sub>	Ano de Início
Journal of Magnetism and Magnetic Materials	2571	0,08	3,046	1998
Journal of Applied Physics	1813	0,02	2,176	1998
Journal of Alloys and Compounds	1741	0,06	3,779	1998
Materials Chemistry and Physics	1300	0,05	2,210	1995
Materials Letters	1213	0,04	2,687	1997
Physical Review B	1045	0	3,813	1997
Materials Research Bulletin	993	0,03	2,873	1999
Ceramics International	971	0,02	3,057	2000
Physica B Condensed Matter	947	0,05	1,453	1997
Applied Physics Letters	862	0	3,495	2007
Physical Review Letters	848	0,07	8,839	1999
Chemistry of Materials	823	0,06	9,890	1997
The Journal of Physical Chemistry C	807	0,02	4,484	2000
Journal of Materials Science	768	0,03	2,993	1999
Journal of the American Chemical Society	752	0,06	14,357	2008
Journal of Solid State Chemistry	745	0,07	2,179	1999
Journal of Physics: Condensed Matter	730	0,03	2,617	2001
The Journal of Physical Chemistry B	698	0,01	3,146	2005
IEEE Transactions on Magnetics	685	0,01	1,467	2002
Journal of the American Ceramic Society	678	0,02	2,956	2000

**Fonte:** Elaborado pelos autores e baseado em dados da Web of Science e CiteSpace.

### 3.3. Análise dos países de origem

Segundo a base de dados do WoS, os trabalhos publicados estão distribuídos em 80 países entre autoria e co-autorias. Dentre os vinte principais, constam 9 do continente asiático, 8 do europeu, 2 do americano e 1 do africano, conforme visualiza-se na Tabela 5, onde apresenta-se o número total de trabalhos, parâmetro BC e o ano de início das publicações na amostra.

O grupo de cooperação econômica BRICS, composto por Brasil, Rússia, China e Índia, publicaram 115 (3,830%), 44 (1,465 %), 483 (16,151 %) e 946 (31,502 %) trabalhos,

respectivamente, e são ranqueados segundo o critério mencionado nas colocações de 10, 18, 2 e 1 respectivamente. A Índia é o líder em trabalhos publicados, porém o BC de 0,25 que é o segundo maior, perdendo somente para o USA. Comportamento que pode ser explicado de acordo com o início das pesquisas na Índia ocorrerem somente em 1999, quatro anos após dos USA, segundo a base de dados da WoS.

O crescimento das pesquisas na Índia no campo da nanotecnologia, se justifica, pois a partir do ano 2000, fomentou-se grandes investimentos no país, com o “Programme on Nanomaterials: Science and Devices” pelo departamento de Ciência e Tecnologia, com iniciativas de apoio à projetos relacionados aos nanomateriais e suas tecnologias (Kumar, 2014). Surgiram ainda, outros planos governamentais como o “Nano Mission Council” (2007-12) que viabilizou o financiamento de equipamentos sofisticados e de alto capital, além da criação de diversos centros de pesquisa em nanotecnologia (Rajput, 2017).

Os USA possuem 247 trabalhos e o maior valor do parâmetro BC (0,42) que evidencia a sua predominância e liderança nas pesquisas sobre as ferritas do tipo espinélio, o que é enfatizado pelo ano de início das pesquisas na área. A China apresenta o terceiro maior número de publicações (483), porém o parâmetro BC é menor em comparação a diversos países dentre os vinte com maior número de trabalhos. Na Figura 3 observa-se a maior centralidade dos USA em relação a Índia e a China, como discutido anteriormente, além de cada nó representar um país e o seu tamanho proporcional às frequências de ocorrência.

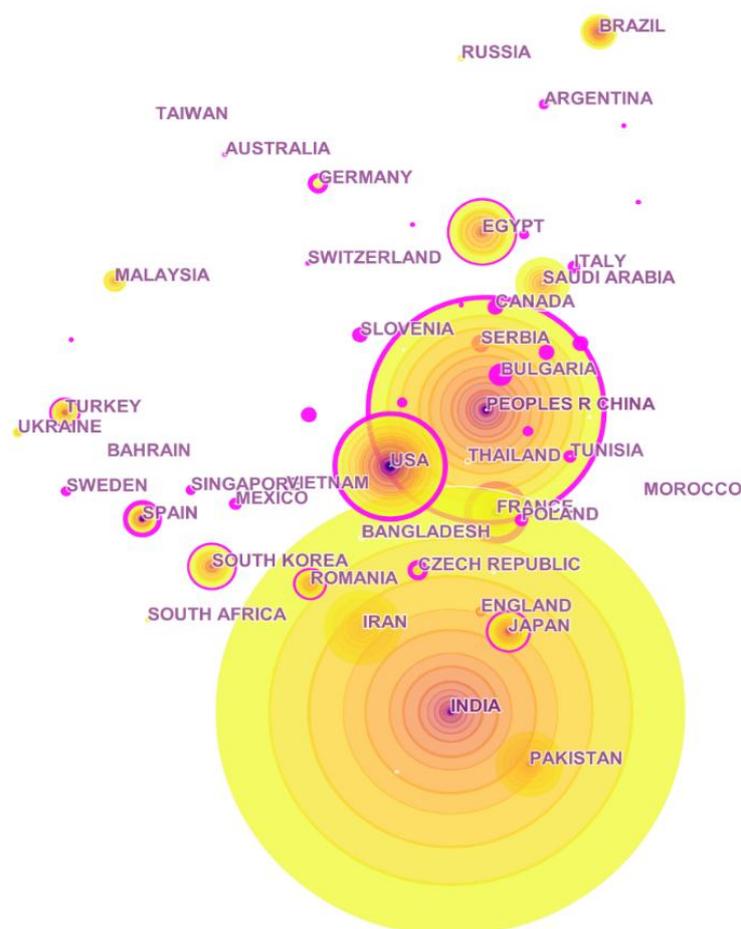
**Tabela 5:** 20 principais países em relação ao número de artigos com autoria e co-autoria.

Contagem	Centralidade	Ano de início	País
946	0,25	1999	Índia
483	0,08	1999	China
247	0,42	1995	USA
169	0,04	2009	Iran
158	0,04	2006	Paquistão
150	0,17	2006	Egito
129	0,06	2009	Arábia Saudita
128	0,13	1997	France
123	0,07	2002	Coreia do Sul
115	0,11	1998	Brasil
110	0,1	1999	Japão
81	0,22	1999	Spain
76	0,04	2007	Turquia
76	0,03	2002	Romênia
67	0,15	2003	Alemanha

59	0,03	2010	Malasia
45	0	1997	Taiwan
44	0,06	2001	Rússia
42	0,03	2003	República Checa
41	0,18	2004	Inglaterra

**Fonte:** Elaborado pelos autores e baseado em dados da Web of Science e CiteSpace.

**Figura 3:** Relação entre os países e a frequência dos trabalhos publicados.



**Fonte:** Web of Science (Jan/2018) e CiteSpace.

### 3.3. Análise das palavras-chave

A frequência de ocorrência das vinte principais palavras chave e o BC estão sumarizadas na Tabela 6. Observa-se que as principais palavras-chave utilizadas nos trabalhos são “nanoparticles” and “magnetic property” com 1474 e 1223 ocorrências respectivamente. A primeira decorre do mecanismos de busca da WoS realizados e trata-se ainda de uma palavra-chave comum usada em grande parte das publicações, enquanto que a segunda evidencia os principais objetivos dos trabalhos, que consiste na caracterização e identificação das

propriedades magnéticas desses materiais. A palavra com maior parâmetro BC trata-se da “cobalt ferrite” com alta centralidade de intermediação, e portanto liga grandes grupos de nós.

Sugere-se que a ferrita de cobalto apresente alto valor de BC, devido as suas singulares propriedades físicas e químicas, que despertam grande interesse dos pesquisadores, tais como elevadas anisotropias magnetocristalinas cúbica e coercividade, magnetização de saturação moderada, boa estabilidade mecânica e química, alta resistência ao desgaste, comportamento eletricamente isolante e propriedades ferrimagnéticas com alta temperatura Curie (Jauhar *et al.*, 2016).

Vale ressaltar que estas propriedades magnéticas são manipuladas em diversas aplicações industriais e tecnológicas, tais como: sensores (Caltun *et al.*, 2008), ressonância magnética (Amiri and Shokrollahi, 2013), sistemas de armazenamento de informação, absorção de micro-ondas (Mathew and Juang, 2007), adsorvente de poluentes em água (Gan *et al.*, 2016; Reddy and Yun, 2016) e aplicações biomédicas (Krishna Surendra *et al.*, 2014; Peeples *et al.*, 2014).

Além de estudos associarem melhores propriedades catalíticas das ferritas de cobalto em relação às demais, como apresentado pelos autores Yan et al. (2013) como performance de 93% de seletividade de benzaldeído a 63% de conversão de álcool benzílico, assim, apresentam grande potencial para esse tipo de aplicação. Assim pelas propriedades apresentadas, sugere-se o alto valor de BC para as ferritas de cobalto.

**Tabela 6:** 20 principais palavras-chave.

Contagem	BC	Palavra-chave
1474	0,06	<i>nanoparticle</i>
1223	0,02	<i>Magnetic property</i>
581	0,02	<i>ferrite</i>
462	0,01	<i>particle</i>
438	0,03	<i>spinel</i>
432	0,06	<i>temperature</i>
326	0,02	<i>Spinel ferrite</i>
297	0,04	<i>Cation distribution</i>
291	0,03	<i>size</i>
274	0,03	<i>Electrical property</i>
273	0	<i>powder</i>
253	0,08	<i>Cobalt ferrite</i>
249	0,06	<i>behavior</i>
248	0,03	<i>Dielectric property</i>
247	0,06	<i>Zinc ferrite</i>
242	0,04	<i>mossbauer</i>
236	0,04	<i>route</i>

216	0,03	<i>nanocrystal</i>
200	0,04	<i>Ferrite nanoparticle</i>
193	0,03	<i>x-ray diffraction</i>

**Fonte:** Elaborado pelos autores e baseado em dados da Web of Science e CiteSpace.

### 3.3. Trabalhos com maior número de citações na WoS

Artigos com grande número de citações provavelmente contribuíram para formação do corpo teórico sobre a área em estudo, e desta forma são considerados relevantes. Pode-se verificar que na Tabela 7, os cinco trabalhos com maior número de citações entre os anos de 1995 a 2017 sobre as estruturas do tipo espinélio.

O trabalho com maior número de citações (2358) é dos autores S. Sun et al. [44] publicado na revista Journal of The American Chemical Society no ano de 2004. Neste trabalho foram produzidas nanopartículas monodispersas de CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> e MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> através da reação com acetilacetato e 1,2-hexadecanediol. Evidenciam ainda, a potencialidade destes materiais em aplicações de nanodispositivos magnéticos e biomagnéticas. Nesta amostra, os demais trabalhos, tratam-se de reviews [45,47 e 48] sobre a produção de compostos magnéticos e sobre a aplicação desses sistemas para fins biotecnológicos, através de testes in vivo, para atuar como sondas magnéticas para identificação de doenças.

**Tabela 7:** Os cinco trabalhos mais citados na WoS.

Título do artigo	Referência	Materiais produzido s/ Review	Citações	Períodico (Ano de publicação)
Monodisperse MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (M = Fe, Co, Mn) Nanoparticles	(Sun <i>et al.</i> , 2004)	CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2358	Journal of The American Chemical Society (2004)
Synthesis of monodisperse spherical nanocrystals	(Park <i>et al.</i> , 2007)	Review	1220	Angewandte Chemie (2007)
Artificially engineered magnetic nanoparticles for ultra-sensitive molecular imaging	(Lee <i>et al.</i> , 2007)	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> CoFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> FeFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	1175	Nature Medicine (2007)
Chemical synthesis of magnetic nanoparticles	(Hyeon, 2003)	Review	1099	Chemical Communications (2003)
Superparamagnetic colloids: Controlled synthesis and niche applications	(Jeong <i>et al.</i> , 2007)	Review	669	Advanced Materials (2007)

#### 4. CONCLUSÕES

Foi possível com a realização da análise bibliométrica identificar a evolução das pesquisas relacionadas com as estruturas do tipo espinélio refletido no aumento do número de trabalhos publicados e o crescimento do número de citações entre os anos de 1995-2017.

Observa-se também a interdisciplinaridade dessa temática, envolvendo principalmente as áreas de química, física e engenharia. Dentre as categorias da WoS, a que apresentou o maior número de publicações no conjunto estudado foi a Física da Matéria Condensada. Foi identificada nessas categorias 13 grandes grupos de pesquisa (clusters), apresentando maiores redes de co-citação os clusters #0 magnetic properties, #2 eletromagnetic properties e #5 effective electrocatalysis properties, permitindo identificar que nestas áreas existe o maior locus de discussão entre os pesquisadores para o entendimento das propriedades e das potenciais aplicações das ferritas.

O periódico *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* apresentou o maior número de ocorrências dos trabalhos e maior parâmetro BC, evidenciando assim, sua proeminente importância na transmissão de informações sobre os materiais estudados neste trabalho. Em relação aos países, a Índia obteve o maior número de ocorrências, porém os EUA detêm o maior parâmetro BC o que indica sua maior influência na área de pesquisa. Identificou-se também, dentre as palavras-chave, “cobalt ferrite” a que detém maior valor parâmetro BC, inferindo que sua ampla utilização ocorre devido às suas propriedades magnéticas e catalíticas singulares, estas estruturas despertem maior atenção dos pesquisadores e assim possuam maior número de ocorrências entre as palavras-chave utilizadas nos estudos.

Foi observado ainda que as principais aplicações dessas estruturas nos últimos anos são voltadas predominantemente para o tratamento de efluentes, sensores, catálise, diagnósticos médicos, aplicações de hipertermia e dispositivos magnéticos. Entendemos que os resultados obtidos por meio deste estudo são significativos, pois além de fornecer referências para os acadêmicos, podem ajudar pesquisadores a identificar novas linhas de pesquisa e tendências acerca da utilização e aplicação dessas estruturas.

Os trabalhos avaliados nesse levantamento bibliométrico, a partir da plataforma *Web of Science*, foram importantes para obter um panorama geral das principais aplicações das ferritas do tipo espinélio. No entanto, para abordagens futuras sobre a temática se faz necessária a ampliação das bases de dados avaliadas, como forma de obter melhoria e atualização contínua

da gestão de conhecimentos sobre essa área.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, pelo apoio a este trabalho.

## Referências

- Abbas, Y. M. et al. (2011) 'Microstructure characterization and cation distribution of nanocrystalline cobalt ferrite', *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Elsevier, 323(22), pp. 2748–2756. doi: 10.1016/j.jmmm.2011.05.038.
- Amiri, S. and Shokrollahi, H. (2013) 'The role of cobalt ferrite magnetic nanoparticles in medical science', *Materials Science and Engineering C*. Elsevier B.V., 33(1), pp. 1–8. doi: 10.1016/j.msec.2012.09.003.
- Ansari, M. et al. (2017) 'Synthesis and characterization of  $\text{Cu}_{0.3}\text{Zn}_{0.5}\text{Mg}_{0.2}\text{Fe}_2\text{O}_4$  nanoparticles as a magnetic drug delivery system', *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Elsevier B.V., 439, pp. 67–75. doi: 10.1016/j.jmmm.2017.04.084.
- Ayesh, A. I. et al. (2017) 'Spinel ferrite nanoparticles for  $\text{H}_2\text{S}$  gas sensor', *Applied Physics A*. Springer Berlin Heidelberg, 123(11), p. 682. doi: 10.1007/s00339-017-1305-7.
- Basiri, F. and Taei, M. (2017) 'Application of spinel-structured  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles for simultaneous electrochemical determination diclofenac and morphine', *Microchimica Acta*. *Microchimica Acta*, 184(1), pp. 155–162. doi: 10.1007/s00604-016-1995-0.
- Baykal, A. et al. (2016) 'MnCr<sub>x</sub>Fe<sub>22-x</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles: Magnetic and Microwave Absorption Properties', *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 26(1), pp. 134–141. doi: 10.1007/s10904-015-0288-0.
- Bhujun, B., Tan, M. T. T. and Shanmugam, A. S. (2016) 'Evaluation of aluminium doped spinel ferrite electrodes for supercapacitors', *Ceramics International*. Elsevier, 42(5), pp. 6457–6466. doi: 10.1016/j.ceramint.2015.12.118.

- Bhukal, S. et al. (2016) 'Substituted Co-Cu-Zn nanoferrites: Synthesis, fundamental and redox catalytic properties for the degradation of methyl orange', RSC Advances. Royal Society of Chemistry, 6(2), pp. 1360–1375. doi: 10.1039/c5ra22561b.
- Bindu, K. et al. (2016) 'Microwave assisted growth of stannous ferrite microcubes as electrodes for potentiometric nonenzymatic H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sensor and supercapacitor applications', Electrochimica Acta. Elsevier Ltd, 217, pp. 139–149. doi: 10.1016/j.electacta.2016.09.083.
- Buzea, C., Pacheco, I. I. and Robbie, K. (2007) 'Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity', Biointerphases, 2(4), pp. MR17–MR71. doi: 10.1116/1.2815690.
- Caltun, O. et al. (2008) 'Substituted cobalt ferrites for sensors applications', Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 320(20), pp. 869–873. doi: 10.1016/j.jmmm.2008.04.067.
- Chamoumi, M. and Abatzoglou, N. (2016) 'NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> production from  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> via improved solid state reaction: Application as catalyst in CH<sub>4</sub> dry reforming', The Canadian Journal of Chemical Engineering, 94(9), pp. 1801–1808. doi: 10.1002/cjce.22561.
- Chen, C. (2005) 'The centrality of pivotal points in the evolution of scientific networks', Proceedings of the 10th international conference on Intelligent user interfaces - IUI '05, p. 98. doi: 10.1145/1040830.1040859.
- Chen, C. (2017) 'Science Mapping: A Systematic Review of the Literature', Journal of Data and Information Science, 2(2), pp. 1–40. doi: 10.1515/jdis-2017-0006.
- Chen, X. J. et al. (2017) 'Preparation and Characterization of Magnetic Cobalt Ferrites/SBA-15 Nanocomposite Adsorbents and the Removal of Methylene Blue', Nano, 12(5), pp. 1–8. doi: 10.1142/S1793292017500606.
- Choi, K. H. et al. (2016) 'Size-Dependent photodynamic anticancer activity of biocompatible multifunctional magnetic submicron particles in prostate cancer cells', Molecules, 21(9), pp. 1–14. doi: 10.3390/molecules21091187.
- Choi, Y. H. et al. (2017) 'Sodium-Containing Spinel Zinc Ferrite as a Catalyst Precursor for the Selective Synthesis of Liquid Hydrocarbon Fuels', ChemSusChem, 10(23), pp. 4764–4770. doi: 10.1002/cssc.201701437.

- Dehghani, F., Hashemian, S. and Shibani, A. (2017) 'Effect of calcination temperature for capability of  $MFe_2O_4$  ( $M = Co, Ni$  and  $Zn$ ) ferrite spinel for adsorption of bromophenol red', *Journal of Industrial and Engineering Chemistry. The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry*, 48, pp. 36–42. doi: 10.1016/j.jiec.2016.11.022.
- Dhand, V. et al. (2017) 'Synthesis and comparison of different spinel ferrites and their catalytic activity during chemical vapor deposition of polymorphic nanocarbons', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 4(4), pp. 441–451. doi: 10.1007/s40684-017-0049-3.
- Dilshad, M. et al. (2016) 'Fabrication and characterization of  $Ni_{1+x}Zr_xFe_{2-2x}O_4$  nanoparticles for potential applications in high frequency devices', *Ceramics International. Elsevier*, 42(14), pp. 16359–16363. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.07.001.
- Domínguez-Arvizu, J. L. et al. (2017) 'Optical properties determination of  $NiFe_2O_4$  nanoparticles and their photocatalytic evaluation towards hydrogen production', *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(51), pp. 30242–30248. doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.09.180.
- Du, Y. et al. (2016) 'Magnetic  $CoFe_2O_4$  nanoparticles supported on titanate nanotubes ( $CoFe_2O_4/TNTs$ ) as a novel heterogeneous catalyst for peroxymonosulfate activation and degradation of organic pollutants', *Journal of Hazardous Materials. Elsevier B.V.*, 308, pp. 58–66. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.01.035.
- Elkholy, A. E., El-Taib Heakal, F. and Allam, N. K. (2017) 'Nanostructured spinel manganese cobalt ferrite for high-performance supercapacitors', *RSC Advances. Royal Society of Chemistry*, 7(82), pp. 51888–51895. doi: 10.1039/c7ra11020k.
- Falsafi, F. et al. (2017) 'Sm-doped cobalt ferrite nanoparticles: A novel sensing material for conductometric hydrogen leak sensor', *Ceramics International*, 43(1), pp. 1029–1037. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.10.035.
- Gan, W. et al. (2016) 'Removal of oils from water surface via useful recyclable  $CoFe_2O_4$ /sawdust composites under magnetic field', *Materials and Design. Elsevier B.V.*, 98, pp. 194–200. doi: 10.1016/j.matdes.2016.03.018.
- Goyal, A. et al. (2014) ' $CoMn_{0.2}Fe_{1.8}O_4$  ferrite nanoparticles engineered by sol-gel technology: An expert and versatile catalyst for the reduction of nitroaromatic compounds', *Journal of Materials*

- Chemistry A. Royal Society of Chemistry, 2(44), pp. 18848–18860. doi: 10.1039/c4ta03900a.
- Haija, M. A. et al. (2017) ‘Characterization of H<sub>2</sub>S gas sensor based on CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles’, Journal of Alloys and Compounds. Elsevier B.V, 690, pp. 461–468. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.08.174.
- Hammad, M., Nica, V. and Hempelmann, R. (2017) ‘Synthesis and Characterization of Bi-Magnetic Core/Shell Nanoparticles for Hyperthermia Applications’, IEEE Transactions on Magnetics, 53(4). doi: 10.1109/TMAG.2016.2635696.
- He, Y., Dai, C. and Zhou, X. (2017) ‘Magnetic cobalt ferrite composite as an efficient catalyst for photocatalytic oxidation of carbamazepine’, Environmental Science and Pollution Research. Environmental Science and Pollution Research, 24(2), pp. 2065–2074. doi: 10.1007/s11356-016-7978-1.
- Hoque, S. M. et al. (2016) ‘Synthesis and characterization of ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles and its biomedical applications’, Materials Letters. Elsevier, 162(3), pp. 60–63. doi: 10.1016/j.matlet.2015.09.066.
- Hou, J., Yang, X. and Chen, C. (2018) ‘Emerging trends and new developments in information science: a document co-citation analysis (2009–2016)’, Scientometrics. Springer Netherlands, 115(2), pp. 869–892. doi: 10.1007/s11192-018-2695-9.
- Hyder, F. and Manjura Hoque, S. (2017) ‘Brain tumor diagnostics and therapeutics with superparamagnetic ferrite nanoparticles’, Contrast Media and Molecular Imaging, 2017. doi: 10.1155/2017/6387217.
- Hyeon, T. (2003) ‘Chemical synthesis of magnetic nanoparticles’, Chem. Commun., (8), pp. 927–934. doi: 10.1039/b207789b.
- Ibrahim, I. et al. (2016) ‘Synthesis of magnetically recyclable spinel ferrite (MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, M=Zn, Co, Mn) nanocrystals engineered by sol gel-hydrothermal technology: High catalytic performances for nitroarenes reduction’, Applied Catalysis B: Environmental. Elsevier B.V., 181, pp. 389–402. doi: 10.1016/j.apcatb.2015.08.005.
- Ignat, M. et al. (2016) ‘Novel Synthesis Route for Chitosan-Coated Zinc Ferrite Nanoparticles as Potential Sorbents for Wastewater Treatment’, Chemical Engineering Communications, 203(12), pp. 1591–1599. doi: 10.1080/00986445.2016.1185711.

- Jaime-González, J. et al. (2016) 'Comparison of ferrite nanoparticles obtained electrochemically for catalytical reduction of hydrogen peroxide', *Journal of Solid State Electrochemistry*, 20(4), pp. 1191–1198. doi: 10.1007/s10008-015-2938-0.
- Jauhar, S. et al. (2016) Tuning the properties of cobalt ferrite: a road towards diverse applications, *RSC Adv.* doi: 10.1039/C6RA21224G.
- Jeong, U. et al. (2007) 'Superparamagnetic colloids: Controlled synthesis and niche applications', *Advanced Materials*, 19(1), pp. 33–60. doi: 10.1002/adma.200600674.
- Jesudoss, S. K. et al. (2016) 'Studies on the efficient dual performance of  $Mn_{1-x}Ni_xFe_2O_4$  spinel nanoparticles in photodegradation and antibacterial activity', *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 165, pp. 121–132. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2016.10.004.
- Jung, K. W., Lee, S. and Lee, Y. J. (2017) 'Synthesis of novel magnesium ferrite ( $MgFe_2O_4$ )/biochar magnetic composites and its adsorption behavior for phosphate in aqueous solutions', *Bioresource Technology*. Elsevier, 245(September), pp. 751–759. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.035.
- Kovalenko, A. et al. (2016) 'Towards improved efficiency of bulk-heterojunction solar cells using various spinel ferrite magnetic nanoparticles', *Organic Electronics: physics, materials, applications*, 39, pp. 118–126. doi: 10.1016/j.orgel.2016.09.033.
- Krishna Surendra, M. et al. (2014) 'Magnetic hyperthermia studies on water-soluble polyacrylic acid-coated cobalt ferrite nanoparticles', *Journal of Nanoparticle Research*, 16(12). doi: 10.1007/s11051-014-2773-8.
- Kumar, A. et al. (2012) 'Nanotechnology: a review.', *Journal of Pharmacy Research*, 5(7), pp. 3630–3634.
- Kumar, A. (2014) *Nanotechnology Development in India: An Overview*. New Delhi.
- Kwon, J. M. et al. (2017) 'Facile hydrothermal synthesis of cubic spinel  $AB_2O_4$  type  $MnFe_2O_4$  nanocrystallites and their electrochemical performance', *Applied Surface Science*. Elsevier B.V., 413, pp. 83–91. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.04.022.
- Lassoued, A. et al. (2018) 'Nanocrystalline  $Ni_xCo_{(0.5-x)}Zn_{0.5}Fe_2O_4$  ferrites: fabrication through coprecipitation route with enhanced structural, magnetic and photo-catalytic activity', *Journal of*

- Materials Science: Materials in Electronics. Springer US, 29(9), pp. 7333–7344. doi: 10.1007/s10854-018-8723-y.
- Lee, J. H. et al. (2007) ‘Artificially engineered magnetic nanoparticles for ultra-sensitive molecular imaging’, *Nature Medicine*, 13(1), pp. 95–99. doi: 10.1038/nm1467.
- Li, C. (2017) ‘A bibliometric analysis of research on haze during 2000–2016’. *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 24733–24742.
- Manikandan, A. et al. (2014) ‘A simple aloe vera plant-extracted microwave and conventional combustion synthesis: Morphological, optical, magnetic and catalytic properties of CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanostructures’, *Journal of Molecular Structure*. Elsevier B.V., 1076, pp. 188–200. doi: 10.1016/j.molstruc.2014.07.054.
- Mathew, D. S. and Juang, R. S. (2007) ‘An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions’, *Chemical Engineering Journal*, 129(1–3), pp. 51–65. doi: 10.1016/j.cej.2006.11.001.
- Nakhate, A. V. and Yadav, G. D. (2017) ‘Hydrothermal Synthesis of CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Magnetic Nanoparticles as Active and Robust Catalyst for N-arylation of Indole and Imidazole with Aryl Halide’, *ChemistrySelect*, 2(8), pp. 2395–2405. doi: 10.1002/slct.201601846.
- Narsimulu, D. et al. (2016) ‘Electrical and electrochemical studies of nanocrystalline mesoporous MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> as anode material for lithium battery applications’, *Ceramics International*. Elsevier, 42(15), pp. 16789–16797. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.07.168.
- Navadeepthy, N. D. et al. (2017) ‘N-doped Graphene/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>: A novel nanocomposite for intrinsic peroxidase based sensing of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>’, *Materials Research Bulletin*. Elsevier Ltd, 95, pp. 1–8. doi: 10.1016/j.materresbull.2017.06.033.
- Park, J. et al. (2007) ‘Synthesis of monodisperse spherical nanocrystals’, *Angewandte Chemie - International Edition*, 46(25), pp. 4630–4660. doi: 10.1002/anie.200603148.
- Patil, S. N. et al. (2016) ‘Investigation of magnesium substituted nano particle zinc ferrites for relative humidity sensors’, *Sensors and Actuators, A: Physical*, 244, pp. 35–43. doi: 10.1016/j.sna.2016.04.019.

- Peeples, B. et al. (2014) 'Structural, stability, magnetic, and toxicity studies of nanocrystalline iron oxide and cobalt ferrites for biomedical applications', *Journal of Nanoparticle Research*, 16(2). doi: 10.1007/s11051-014-2290-9.
- Peng, X. et al. (2017) 'Bio-power performance enhancement in microbial fuel cell using Ni-ferrite decorated anode', *RSC Advances. Royal Society of Chemistry*, 7(26), pp. 16027–16032. doi: 10.1039/C7RA01253E.
- Praveen Kumar, J. et al. (2017) 'Metal ferrite nanoparticles: Synthesis, characterization, and studies on decontamination of sulfur mustard', *Journal of Alloys and Compounds. Elsevier B.V.*, 692, pp. 833–840. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.09.083.
- Rahman, A. et al. (2016) 'Microwave dielectric properties of  $Mn_x Zn_{(1-x)}Fe_2O_4$  ceramics and their compatibility with patch antenna', *Journal of Sol-Gel Science and Technology. Springer US*, 77(2), pp. 470–479. doi: 10.1007/s10971-015-3937-4.
- Rajput, N. (2017) 'Development of Nanotechnology in India: A Review', *IOSR Journal of Applied Physics*, 09(03), pp. 45–50. doi: 10.9790/4861-0903034550.
- Rasheed, A. et al. (2016) ' $Zr_xCo_{0.8-x}Ni_{0.2-x}Fe_2O_4$ -graphene nanocomposite for enhanced structural, dielectric and visible light photocatalytic applications', *Ceramics International. Elsevier*, 42(14), pp. 15747–15755. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.07.036.
- Rashmi, Shankar K. et al. (2017) 'Influence of  $Sm^{3+}$  ions on structural, optical and solar light driven photocatalytic activity of spinel  $MnFe_2O_4$  nanoparticles', *Journal of Solid State Chemistry. Elsevier Inc.*, 255(July), pp. 178–192. doi: 10.1016/j.jssc.2017.08.013.
- Rashmi, S. K. et al. (2017) 'Solar light responsive Sm-Zn ferrite nanoparticle as efficient photocatalyst', *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology. Elsevier*, 225(May), pp. 86–97. doi: 10.1016/j.mseb.2017.08.012.
- Reddy, D. H. K. et al. (2017) 'Fabrication of Stable and Regenerable Amine Functionalized Magnetic Nanoparticles as a Potential Material for Pt(IV) Recovery from Acidic Solutions', *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(22), pp. 18650–18659. doi: 10.1021/acsami.6b16813.
- Reddy, D. H. K. and Yun, Y. S. (2016) 'Spinel ferrite magnetic adsorbents: Alternative future materials for water purification?', *Coordination Chemistry Reviews. Elsevier B.V.*, 315, pp. 90–111. doi:

10.1016/j.ccr.2016.01.012.

Sánchez, J. et al. (2017) 'Synthesis of  $Mn_xGa_{1-x}Fe_2O_4$  magnetic nanoparticles by thermal decomposition method for medical diagnosis applications', *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. Elsevier, 427(June 2016), pp. 272–275. doi: 10.1016/j.jmmm.2016.10.098.

Sharma, U. S. and Shah, R. (2016) 'Study of polyaniline coated  $CuFe_2O_4$  nanoparticles and their application in biosensor', *AIP Conference Proceedings*, 1728. doi: 10.1063/1.4946326.

Shetty, K. et al. (2017) 'A comparative study on  $CuFe_2O_4$ ,  $ZnFe_2O_4$  and  $NiFe_2O_4$ : Morphology, Impedance and Photocatalytic studies', *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd, 4(11), pp. 11806–11815. doi: 10.1016/j.matpr.2017.09.098.

Sivakumar, P. et al. (2011) 'Preparation and properties of nickel ferrite ( $NiFe_2O_4$ ) nanoparticles via sol-gel auto-combustion method', *Materials Research Bulletin*. Elsevier Ltd, 46(12), pp. 2204–2207. doi: 10.1016/j.materresbull.2011.09.010.

Srivastava, V., Kohout, T. and Sillanpää, M. (2016) Potential of cobalt ferrite nanoparticles ( $CoFe_2O_4$ ) for remediation of hexavalent chromium from synthetic and printing press wastewater, *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.jece.2016.06.002.

Subbiah, K. et al. (2017) 'Fabrication of a cerium-doped nickel ferrite solid-state reference electrode and its performance evaluation in concrete environment', *Sensors and Actuators, B: Chemical*. Elsevier B.V., 251, pp. 509–523. doi: 10.1016/j.snb.2017.05.002.

Sun, S. et al. (2004) 'Monodisperse  $MFe_2O_4$  ( $M = Fe, Co, Mn$ ) Nanoparticles', *Journal of the American Chemical Society*, 126(1), pp. 273–279. doi: 10.1021/ja0380852.

Sundararajan, M. et al. (2017) 'Visible light driven photocatalytic degradation of rhodamine B using Mg doped cobalt ferrite spinel nanoparticles synthesized by microwave combustion method', *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 108(March), pp. 61–75. doi: 10.1016/j.jpcs.2017.04.002.

Tan, C. et al. (2017) 'Efficient degradation of paracetamol with nanoscaled magnetic  $CoFe_2O_4$  and  $MnFe_2O_4$  as a heterogeneous catalyst of peroxy monosulfate', *Separation and Purification Technology*. Elsevier B.V., 175, pp. 47–57. doi: 10.1016/j.seppur.2016.11.016.

- Thanigai Arul, K. et al. (2016) 'Novel polyvinyl alcohol polymer based nanostructure with ferrites co-doped with nickel and cobalt ions for magneto-sensor application', *Polymer International*, 65(12), pp. 1482–1485. doi: 10.1002/pi.5242.
- Toksha, B. G. et al. (2017) 'Auto-ignition synthesis of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  with  $\text{Al}^{3+}$  substitution for high frequency applications', *Ceramics International*. Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 43(16), pp. 14347–14353. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.07.191.
- Velinov, N. et al. (2017) 'Synthesis and Mössbauer spectroscopic investigation of copper-manganese ferrite catalysts for water-gas shift reaction and methanol decomposition', *Materials Research Bulletin*. Elsevier Ltd, 95, pp. 556–562. doi: 10.1016/j.materresbull.2017.06.019.
- Warsi, M. F. et al. (2017) 'New  $\text{LiNi}_{0.5}\text{PrxFe}_{2-x}\text{O}_4$  nanocrystallites: Synthesis via low cost route for fabrication of smart advanced technological devices', *Ceramics International*, 43(17), pp. 14807–14812. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.07.228.
- Wu, J. et al. (2016) 'Highly selective gas sensing properties of partially inversed spinel zinc ferrite towards  $\text{H}_2\text{S}$ ', *Sensors and Actuators, B: Chemical*. Elsevier B.V., 235, pp. 258–262. doi: 10.1016/j.snb.2016.05.083.
- Wu, X. et al. (2016) 'PEG-assisted hydrothermal synthesis of  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$  nanoparticles with enhanced selective adsorption properties for different dyes', *Applied Surface Science*. Elsevier B.V., 389, pp. 1003–1011. doi: 10.1016/j.apsusc.2016.08.053.
- Yan, K. et al. (2013) 'Facile synthesis and catalytic property of spinel ferrites by a template method', *Journal of Alloys and Compounds*, 552, pp. 405–408. doi: 10.1016/j.jallcom.2012.11.054.
- Žalnėravičius, R. et al. (2016) 'Size-dependent antimicrobial properties of the cobalt ferrite nanoparticles', *Journal of Nanoparticle Research*, 18(10). doi: 10.1007/s11051-016-3612-x.
- Zarbin, A. J. G. (2007) 'QUÍMICA DE (NANO)MATERIAIS', 30(6), pp. 1469–1479.
- Zhao, Y. et al. (2017) 'Facile preparation of  $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{MoS}_2$  composite material with synergistic effect for high performance supercapacitor', *Journal of Alloys and Compounds*, 726, pp. 608–617. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.07.327.
- Zheng, M., Fu, H. and Ho, Y. (2017) 'Research trends and hotspots related to ammonia oxidation based

on bibliometric analysis'. Environmental Science and Pollution Research, pp. 20409–20421. doi: 10.1007/s11356-017-9711-0.

Zhu, J. and Hua, W. (2017) 'Visualizing the knowledge domain of sustainable development research between 1987 and 2015: a bibliometric analysis', Scientometrics. Springer Netherlands, 110(2), pp. 893–914. doi: 10.1007/s11192-016-2187-8.

#### **Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Jomar José Knaip Ribeiro – 40%

Paulo Sérgio da Silva Porto – 10%

Paulo Sérgio Moscon – 10%

José Rafael Cápua Proveti – 10%

Marcio Solino Pessoa – 10%

Rodrigo Dias Pereira – 10%

Eduardo Perini Muniz – 10%