



APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE): UM ESTUDO DE REVISÃO¹

APPLICABILITY OF ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE SPECTROSCOPY (EPR): A REVIEW STUDY

Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira²

Submetido em: 23/03/2021

Aprovado em: 15/04/2021

RESUMO

Existem diversas técnicas analíticas que permitem estudar e caracterizar espécies químicas. Dentro dos métodos físicos de análise inorgânica destaca-se a ressonância, como uma das melhores opções para se estudar estruturas variadas, principalmente aquelas que contêm centros metálicos. Trata-se de um estudo teórico de revisão, de natureza exploratória e qualitativa, com objetivo de apresentar a ressonância paramagnética de elétrons (RPE) como um dos tipos de ressonância utilizados em análise química. O estudo possibilitou conhecer diversas aplicações da técnica de RPE, comparando-a com outros métodos físicos de análise química.

PALAVRAS-CHAVE: Análise inorgânica. Metais de transição. Ressonância. *Spin*.

ABSTRACT

There are several analytical techniques that allow studying and characterizing chemical species. Within the physical methods of inorganic analysis, resonance stands out as one of the best options for studying varied structures, especially those that contain metal centers. This is a theoretical review study, exploratory and qualitative in nature, with the objective of presenting the paramagnetic resonance of electrons (RPE) as one of the types of resonance used in chemical analysis. This study made it possible to know several applications of the technique and understand based on its selectivity, what leads it to be a better option compared to other physical methods of chemical analysis.

KEYWORDS: *Inorganic analysis. Transition metals. Resonance. Spin.*

INTRODUÇÃO

A química vem progredindo por meio do desenvolvimento de técnicas analíticas cada vez mais sensíveis. Através de métodos físicos seletivos e não destrutivos como a ressonância, têm sido possíveis grandes avanços, por exemplo, no estudo de sistemas bioinorgânicos e catalíticos.

¹ Artigo desenvolvido como requisito para cumprimento de créditos do Mestrado Internacional em Química – Integralize Corporation, 2021/1, sob orientação do professor Hélio Sales Rios.

² Discente do Programa de Integralização de Créditos Educacionais – Integralize Corporation.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
UM ESTUDO DE REVISÃO
Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

A necessidade de compreender mais profundamente as propriedades magnéticas das moléculas vem se fazendo cada vez mais necessária dentro da área da magnetoquímica que, segundo Vaz *et al.* (2010, p. 1756) tem como principal objetivo, “a compreensão dessas propriedades, envolvendo, inclusive, conceitos de modelagem molecular”.

“O magnetismo molecular é um campo de pesquisa em rápida expansão, cujo tema central é o projeto e o estudo de moléculas magnéticas e materiais com propriedades sintonizáveis” (CORONADO & DUNBAR, 2009, p. 3293).

Segundo Weller *et al.* (2017, p. 234) “muitos dos métodos físicos usados na pesquisa em química inorgânica contemporânea dependem da interação da radiação eletromagnética com a matéria”.

“Várias técnicas de investigação estrutural dependem do estabelecimento de ressonância com uma separação de níveis de energia pela aplicação da radiação eletromagnética, com essas separações energéticas, em alguns casos, sendo controladas pela aplicação de um campo magnético” (WELLER *et al.*, 2017, p. 247).

A ressonância magnética nuclear (RMN) é uma forma de espectrometria de absorção onde, sob condições apropriadas, núcleos podem absorver radiação eletromagnética na região de radiofrequência em frequências determinadas por suas características estruturais (CIENFUEGOS & VAITSMAN, 2000, p. 417).

Uma outra aplicação da RMN é o estudo não destrutivo do corpo humano, no auxílio ao diagnóstico de anormalidades não perceptíveis por outras técnicas de imagem, visto que possui alta sensibilidade.

Já a ressonância paramagnética (RPE) é uma técnica permite o estudo de espécies químicas paramagnéticas.

“Dois elétrons com *spins* em direção oposta são ditos *spins* antiparalelos. (Dois elétrons em um átomo podem ter *spins* paralelos, isto é, na mesma direção, mas somente se esses elétrons estiverem em orbitais diferentes). Por causa do efeito magnético produzido pela presença de um elétron desemparelhado em um átomo, uma substância que contém um ou mais elétrons desemparelhados é fracamente atraída em um campo magnético (em direção à um ímã). Este comportamento é chamado paramagnetismo e, pelo uso de grandes ímãs, medidas precisas do efeito podem ser realizadas. Os resultados podem ser utilizados na determinação do número de elétrons desemparelhados na substância” (RUSSEL, 1994, p. 267).

A RPE tem sido empregada em estudos de diversas áreas do conhecimento científico, vista sua versatilidade no uso concomitante de outras técnicas instrumentais. Este breve estudo tem como objetivo apresentar a técnica de RPE e algumas de suas aplicações.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
UM ESTUDO DE REVISÃO
Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

Este artigo tem como objetivo geral apresentar a técnica de RPE como método físico não destrutivo. Como objetivos específicos, buscou-se descrever a técnica e sua importância nas mais diversas áreas da ciência, enfatizando sua larga aplicabilidade na química inorgânica.

A presente revisão, portanto, justifica-se pela necessidade de contribuir para o fortalecimento da literatura nacional sobre a temática abordada, mostrando a gama de análises possíveis via RPE e seu uso concomitante à outras técnicas analíticas, com foco em suas aplicações.

METODOLOGIA

O presente artigo trata de um estudo de revisão teórica, natureza exploratória e abordagem qualitativa. Foram feitas buscas por publicações nas bases SciELO, Portal de Periódicos da CAPES e Science Research. Refinando a busca por resultados mais precisos, utilizou-se o descritor “*Electron Paramagnetic Resonance*”. Como critério para exclusão, foram lidos os resumos das publicações filtradas, mantendo somente aquelas que demonstraram afinidade com os objetivos da corrente pesquisa. Também, foram analisados livros físicos de química geral, química inorgânica e análise instrumental. O critério de exclusão, para os livros, foi baseado na busca pelo assunto, ou correlatos, através do sumário, que fossem considerados relevantes para a pesquisa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca por publicações no Science Research apresentou inúmeros resultados. Para realizar uma melhor seleção, primeiro selecionaram-se publicações com base em seu título. Em um segundo momento, foram lidos os resumos das publicações da primeira filtragem. Assim, foram selecionadas dez publicações do SciELO, dez do Portal de Periódicos da CAPES e duas do Science Research.

Em seguida, buscaram-se informações em livros físicos. À disposição havia sete livros, sendo três de química geral, três de química inorgânica e um de análise instrumental. Dos sete livros utilizados, aproveitaram-se dois de química geral, um de química inorgânica e um de análise instrumental.

O número quântico magnético de *spin* (m_s) ou simplesmente *spin* (s) de um elétron indica o sentido de rotação da partícula que, ao rotacionar, produz campos magnéticos.

“O *spin* do elétron é a base da técnica experimental de ressonância paramagnética do elétron (RPE), que é usada para estudar as estruturas e movimentos de moléculas e íons que têm elétrons desemparelhados, baseando-se na mudança nas orientações de *spin*” (ATKINS & JONES, 2012, p. 31).

O valor de *spin* pode ser $+1/2$ ou $-1/2$, dependendo do sentido de rotação do elétron. Se dois elétrons rotacionam em sentidos opostos, criam um campo magnético onde se atraem, mas,



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
UM ESTUDO DE REVISÃO
Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

se rotacionam em sentidos iguais, criam um campo magnético de repulsão. Portanto, se um orbital atômico está completo, implica que seus elétrons rotacionam em sentidos opostos.

Segundo Weller *et al.* (2017, p. 252) a técnica “consiste na observação da absorção ressoante por elétrons desemparelhados em um campo magnético [...] para o estudo de espécies paramagnéticas, como radicais orgânicos e elementos do grupo principal”.

O espectrômetro de ressonância paramagnética de elétrons (Figura 1), permite análises em bandas diversas do espectro eletromagnético, em frequência específica, sendo largamente empregado na caracterização de estruturas, principalmente inorgânicas, que contêm elementos dos blocos *d* e *f* da tabela periódica.

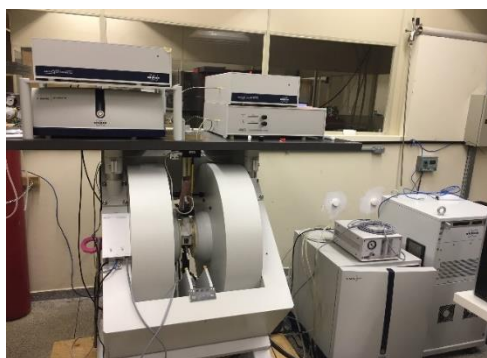


Figura 1 – Espectrômetro de RPE. Fonte: Instituto de Física, UnB.

Os metais de transição são aqueles cujos subníveis de energia *d* e *f* estão parcialmente ocupados em alguns estados de oxidação, o que os torna, nesses estados, espécies paramagnéticas.

Geralmente utilizam-se espectrômetros de RPE de onda contínua para a obtenção dos espectros desejados. Durante a análise a frequência de micro-ondas é constante, ordem de 9 GHz, mas a potência do campo magnético pode variar.

Segundo Weller *et al.* (2017, p. 252), nessa faixa, o espectrômetro é de banda X. “Um espectrômetro de banda S (frequência de ressonância 3 GHz) e aqueles operando em campos mais altos, banda Q (35 GHz) e W (95 GHz), podem complementar as informações obtidas com um espectrômetro de banda X”.

A RPE tem se mostrado muito útil e viável na caracterização estrutural e estudo das propriedades de espécies peculiares em nichos da química inorgânica e orgânica, bioinorgânica, magnetoquímica, bioquímica, farmacologia, medicina, agricultura, indústria e tecnologia de materiais, entre outros.

Essa técnica espectroscópica, importante para a química bioinorgânica, fornece informações de “identidade, geometria de coordenação, estado de *spin*, estado de oxidação e outros aspectos eletrônicos de metais biologicamente relevantes” (TELSER, KRZYSTEK e



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
UM ESTUDO DE REVISÃO
Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

OZAROWSKI, 2014, p. 297).

“A interação de íons metálicos com ligantes redox ativos é de grande importância, pois a interação desempenha um papel essencial nos processos bioquímicos de redox” (DROUZA *et al.*, 2013, p. 329).

Segundo Atkins e Jones (2012, p. 669), “a capacidade de existir em diferentes estados de oxidação é responsável por muitas propriedades químicas desses elementos e tem papel importante na ação de muitas biomoléculas”.

Telser, em um estudo individual, (2006, p. 1501) destacou o uso da RPE na investigação da estrutura eletrônica de complexos paramagnéticos contendo metais de transição, dando ênfase nos estudos sobre a Teoria do Campo Cristalino (TCC) que precederam essa técnica analítica.

Smirnova *et al.* (2007, p. 3686) reconheceram a RPE como “uma ferramenta biofísica poderosa para estudar a estrutura dinâmica de sistemas macromoleculares”, como proteínas solúveis em água. Segundo os autores, esses estudos são possíveis graças à sensibilidade da técnica, mesmo em sistemas sem disponibilidade de estruturas cristalinas.

Os metais de transição, principalmente do bloco *d*, são muito importantes na formação de compostos de coordenação bioativos. No entanto, metais representativos como Mg, Na e Ca, por exemplo, participam de importantes processos biológicos celulares.

Camargos e Alonso (2013, p. 815) destacaram a contribuição da RPE no campo das ciências biológicas, mais especificamente no estudo das propriedades dinâmicas e estruturais das membranas celulares.

Karpefors *et al.* (1996, p. 2823) discutiram sobre a importância das espécies Cu^+ e Cu^{2+} no desempenho de vários processos naturais, abordando sobre a atividade bioquímica das proteínas que possuem esses íons como sítio ativo.

Em suas pesquisas utilizando RPE no estudo da polaridade de ligações de hidrogênio em estruturas fosfolipídicas, Smirnova *et al.* (2007, p. 3687), investigaram a sensibilidade de parâmetros magnéticos na caracterização de gradientes de polaridade em bicamadas de fosfolipídios.

Íons metálicos coordenam-se com diversas biomoléculas. As metaloproteínas, por exemplo, que podem conter um ou mais centros metálicos, executam diversas funções no organismo, e que podem variar conforme variam os íons dos metais.

Atualmente as estruturas dos sítios de coordenação dos metais, antes determinadas por difração de raios-X, também utilizam técnicas de ressonância (WELLER *et al.*, 2017, p.769).

A RPE também é apresentada como ferramenta de análise em amostras de soluções de hemina e mioglobina, destacando a força de detecção da técnica.

“A detecção de força de ressonância magnética agora é capaz de atingir uma sensibilidade de *spin* extremamente alta. [...] há demandas crescentes para suas aplicações em amostras de estado líquido nas áreas de pesquisa das ciências



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
UM ESTUDO DE REVISÃO
Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

da vida porque muitas proteínas e enzimas são biofuncionalmente ativas apenas em soluções [...]. Essa técnica seria particularmente útil para obter uma visão mais detalhada da estrutura eletrônica de metaloproteínas/metaloenzimas sob condições biologicamente ativas” (OKAMOTO *et al.*, 2018, p. 223702-1).

Panarelli, Gast e Groenen (2020, p. 9487) abordam sobre a combinação da RPE com outras técnicas de detecção óptica, justificada pela versatilidade reacional de muitas espécies (bio) químicas com características paramagnéticas.

No entanto, os autores cogitam a possibilidade da combinação da RPE com outras técnicas alternativas, visando o estudo mais preciso de mecanismos de reações moleculares, incluindo a detecção de intermediários paramagnéticos.

Levando as análises via RPE para o lado dos recursos naturais, Chendynski *et al.* (2015) aduziram estudos sobre a RPE na análise do biodiesel, cujo estudo permitiu observar de maneira mais clara a formação de radicais livres na degradação oxidativa do biocombustível na presença de metais.

Em um estudo similar, Mantovani *et al.* (2018), demonstraram que, mesmo o biodiesel sendo “uma alternativa ambientalmente correta [...], sua degradação causada por reações oxidativas gera radicais livres que danificam a mecânica dos veículos”.

Estudos sobre a viabilidade do uso da RPE na agricultura, visando a caracterização de adubos orgânicos como alternativa aos químicos, foram apresentados por Simões *et al.* (2007, pp. 1320; 1326). O uso da técnica também permitiu a detecção de impurezas com estruturas paramagnéticas, advindas da adição de solos e carvão vegetal.

Balena *et al.* (2011, p. 1788) trilham a linha de análise de solos argilosos, altamente intemperizados, tendo o cátion Fe^{3+} como analito de interesse, utilizando as análises espectroscópicas via RPE e UV-VIS por refletância difusa (DRUV-VIS) para o estudo.

Já Manzan *et al.* (2015, p. 2607), mencionaram o uso da técnica no estudo de vidros especiais contendo íons de metais de transição com características de luminescência, como o Mn^{2+} , devido à alta sensibilidade de seus espectros ópticos. Estudos anteriores explicam que a espectroscopia de RPE é adequada ao estudo da coordenação dos íons Mn^{2+} e Mn^{4+} em matrizes vítreas, em especial nos processos de cristalização.

A técnica abordada também tem grande importância no campo industrial e de materiais de interesse tecnológico. Anjos *et al.* (2006, p. 1540) discorreram sobre os esforços que vêm sendo feitos, não somente por meio da RPE, mas também RMN, destacando especialmente aqueles com foco no estudo das propriedades físico-químicas de complexos de radicais fenoxil que contêm variados metais de transição, como Ga, Fe, Mn, Cr, Sc e Co.

“Compósitos de sílica-carbono [...] devido à sua alta condutividade elétrica, estabilidade térmica e alta resistência a solventes orgânicos são amplamente utilizados na indústria como adsorventes para fins medicinais, analíticos e de extração. [...]. O excelente método para estudar a estrutura eletrônica local C é a



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
UM ESTUDO DE REVISÃO
Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

Ressonância Paramagnética de Elétrons, que foi já foi usada anteriormente para a investigação da estrutura eletrônica das diferentes formas de carbono no carbono amorfo, livre de hidrogênio, carbono nanoporoso e carvões.” (SAVCHENKO, *et al.*, 2014, p. 133704).

Matsumoto e Shimosaka (2017, p. 1059), em seus estudos, demonstraram o uso da RPE na quantificação de radicais nitroxila em compostos orgânicos de alta pureza. Segundo os autores,

“os espectros de ressonância paramagnética de elétrons foram obtidos usando um dispositivo de interferência quântica supercondutor [...], em uma ampla faixa de temperatura ambiente, próxima à temperatura do hélio líquido. [...] demonstrando a possibilidade desses compostos atuarem como materiais e referência no fornecimento de quantificação confiável de radicais livres por unidade de massa [...]” (MATSUMOTO & SHIMOSAKA, 2017, p. 1059).

Ligas contendo *terras raras* como o Európio, do tipo $\text{Eu}_{0,05}\text{Ca}_{0,95}\text{MnO}_3$ foram estudadas por Santiago *et al.* (2010). Junto à outras técnicas instrumentais, o uso da RPE permitiu a caracterização espectral e observação da reconfiguração eletrônica dos metais presentes na liga.

Villareal *et al.* (2012) relataram a aplicação a técnica para a caracterização magnética da liga $\text{CuAl}_{0,67}\text{Cr}_{0,33}\text{S}_2$, sintetizada via fusão direta. Segundo os autores, a simetria encontrada nos sinais da RPE possibilitou melhores ajustes nas curvas espectrais, levando em consideração os efeitos de absorção e dispersão de micro-ondas.

Drouza *et al.* (2013, p. 329) estudaram a eficiência da RPE como técnica instrumental na análise de complexos de coordenação octaédrica de vanádio, com estruturas pré-determinadas por cristalografia de raios-X. Os autores, explicam que, em combinação com a espectroscopia UV-VIS, o uso da RPE permite a investigação da estabilidade e protonação de oxigênio nas estruturas ligadas ao vanádio.

Castilha, Silva e Betancourt (2012) também tiveram foco no vanádio como metal de interesse, direcionando seus objetivos para o uso da RPE no estudo de hidrotreatamento catalítico, que, segundo Saraev *et al.* (2000), possui sensibilidade e seletividade muito altas, quando se deseja identificar espécies metálicas com propriedades paramagnéticas.

“A Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE) tem sido utilizada como ferramenta para estabelecer certos detalhes estruturais que afetam a atividade dos sistemas catalíticos, fornecendo informações sobre o estado de oxidação dos centros metálicos [...], o efeito do suporte e as diferentes alterações que poderiam ser geradas durante os testes catalíticos, em sistemas nanoestruturados à base de vanádio, preparados a partir de uma nova rota de síntese” (CASTILHA, SILVA & BETANCOURT, 2012).

Santiago *et al.* (2010, p. 25) chamam a atenção para a relação entre o desenvolvimento tecnológico e a urgência na produção de materiais inovadores, por exemplo, que produzam respostas elétricas e magnéticas em consonância.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
UM ESTUDO DE REVISÃO
Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

“Os óxidos de manganês [...] têm despertado grande interesse, pelo fato de apresentarem um fenômeno conhecido como magnetorresistência, onde a resistência muda em função do campo magnético, que [...] se deve ao comportamento isolante paramagnético à temperatura ambiente e do metal ferromagnético a baixas temperaturas” (WOLLAN & KOEHLER, 1955; WOO-HWAN JUNG, 1998 *apud* SANTIAGO *et al.*, 2010, p. 25).

Tait *et al.* (2019, p. 21588) estudaram a RPE na investigação dos efeitos de aumento em ângulos de torção em espécies utilizadas em dispositivos eletrônicos orgânicos, baseadas em antraceno, tetraceno e pentaceno. Os autores explicaram que as alterações angulares influenciam em propriedades cinéticas e na geometria molecular, mas fornecem oportunidades para o ajuste de propriedades eletrônicas.

“O uso de composto inorgânicos, principalmente aqueles contendo metais, era muito limitado até a demonstração da atividade anticancerígena de complexos contendo platina, por Rosenberg e colaboradores no final dos anos 60” (ROSENBERG, 1969 *apud* FONTES *et al.*, 1997).

Cienfuegos e Vaitsman (2000, p. 421) exaltaram as técnicas de ressonância, destacando que vêm “avançando a grandes passos, com novos equipamentos, acompanhando a velocidade do desenvolvimento tecnológico e científico com mudanças no hardware, software e novas aplicações”.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vista sua larga aplicação como método analítico, considerando-se sua versatilidade e viabilidade, a RPE vem se mostrando muito eficaz na caracterização e estudo de espécies paramagnéticas em diferentes nichos da ciência.

O método de pesquisa adotado foi adequado, e os resultados atenderam satisfatoriamente o objetivo proposto, permitindo a compreensão da técnica e elucidação de suas aplicações em diferentes áreas, onde buscou-se destacar a química inorgânica, visto que um dos focos de estudo da RPE são íons metálicos.

Estudos apontam possíveis melhorias quanto ao uso das técnicas de ressonância, sendo que hoje vem sendo explorado o emprego de espectrômetros de RPE pulsados, que permitem melhores leituras das propriedades dinâmicas de sistemas paramagnéticos.

REFERÊNCIAS

ANJOS, A. *et al.* New phenoxyl radical complexes of manganese, gallium indium and iron based on H₂bbpen ligand derivate. **Journal of the Brazilian Chemistry Society**, v. 17, n. 8, p. 1540-1550, 2006.

ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
 UM ESTUDO DE REVISÃO
 Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

BALENA, S. P. *et al.* Use of Fe³⁺ iron probe study intensively weathered soils utilizing Electron Paramagnetic Resonance and Optical Spectroscopy. **Journal of the Brazilian Chemistry Society**, v. 22, n. 9, p. 1788-1794, 2011.

CAMARGOS, H. S.; ALONSO, A. Electron Paramagnetic Resonance (EPR) spectral components of spin-labeled lipids in saturated phospholipid bilayers. Effect of cholesterol. **Química Nova**, v. 36, n. 6, p. 815-821, 2013.

CASTILHA, S. P.; SILVA, P.; BETANCOURT, P. Uso da Ressonância Paramagnética Eletrônica no estudo de catalisadores à base de vanádio: hidrotratamento catalítico. **Jornal da Faculdade de Engenharia da Universidade Central da Venezuela**, Caracas, v. 27, n. 4, dez. 2012.

CHENDYNSKI, L. T. *et al.* Analysis of the formation of radicals in biodiesel in contact with copper and metallic alloys via electronic paramagnetic resonance (EPR). **Fuel**, Elsevier, v. 242, n. 15, p. 316-322, abr. 2019.

CIENFUEGOS, F.; VAITSMAN, D. **Análise Instrumental**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000.

CORONADO, E.; DUNBAR, K. R. Preface for the forum on molecular magnetism: the role of inorganic chemistry. **Inorganic Chemistry**, American Chemical Society, v. 48, n. 8, p. 3293-3295, abr. 2009.

DROUZA, C. *et al.* Structural and electron paramagnetic resonance (EPR) characterization of novel vanadium (V/IV) complexes with hidroquinonate-iminodiacetate ligands exhibiting "noninnocent" activity. **Pure and Applied Chemistry**, v. 85, n. 2, p. 329-342, dez. 2013.

FONTES, A. P. S. *et al.* Compostos de platina em quimioterapia do câncer. **Química Nova**, São Paulo, v. 2, n. 4, p. 398-406, jul./ago. 1997.

KARPEFORS, M. *et al.* Electron Paramagnetic Resonance studies of the soluble Cu_A protein the cytochrome *ba₃* of *Thermus thermophilus*. **Biophysical Journal**, Biophysical Society, v. 71, p. 2823-2829, abr. 1996.

MANTOVANI, A. C. G. *et al.* Monitoring free radicals formation in the biodiesel oxidation reaction via electron paramagnetic resonance. **Fuel**, Elsevier, v. 224, n.15, p. 255-260, jul. 2018.

MANZAN, R. S. *et al.* Optical and structural studies of Mn²⁺ doped SbPO₄ZnO-PbO glasses. **Journal of the Brazilian Chemistry Society**, v. 26, n. 12, p. 2607-2614, 2015.

MATSUMOTO, N.; SHIMOSAKA, T. Low-temperature Electronic Paramagnetic Resonance measurements of TEMPO and 4-hydroxy-TEMPO benzoate of purity analyses by effect magnetic-moment method. **Analytical Sciences**, v. 33, n. 9, p. 1059-1065, 2017.

PANARELLI, E. G.; GAST, P.; GROENEN, E. J. J. Temperature-cycle electron paramagnetic resonance. **Physical Chemistry Chemical Physics**, n. 22, p. 9487-9493, abr. 2020.

ROESENBERG, B. *cols.* Platinum compounds: a new class of potent antitumour agents. **Nature International Journal of Science**, v. 222, p. 385-386.

SANTIAGO, M. *et al.* Síntesis y estudio de resonancia paramagnética eletrônica de CaMnO₃ y Eu_{0,05}Ca_{0,95}MnO₃ obtenidos por coprecipitación. **Superficies y Vacío**, v. 23, n. 4, p. 25-30, dez. 2010.



RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR
ISSN 2675-6218

APLICABILIDADES DA ESPECTROSCOPIA DE RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA DE ELÉTRONS (RPE):
 UM ESTUDO DE REVISÃO
 Leandro José Dias Gonçalves de Oliveira

SAVCHENKO, D. V. *et al.* Electron Paramagnetic Resonance study of paramagnetic centers in carbon-fumed silica adsorbent. **Journal of Applied Physics**, v. 115, p. 133704-133711, 2014.

SIMÕES, M. L. *et al.* Caracterização de adubos orgânicos por espectroscopia de ressonância paramagnética eletrônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 31, p. 1819-1827, maio 2007.

SMIRNOVA, T. I. *et al.* Local polarity and hydrogen bonding inside the Sec14p phospholipid-binding cavity: high-field multi-frequency electron paramagnetic resonance studies. **Biophysical Journal**, Biophysical Society, v. 92, p. 3686-3695, fev. 2007.

TAIT, C. E. *et al.* Photoexcited triplet states of twisted acenes investigated by Electron Paramagnetic Resonance. **Physical Chemistry Chemical Physics**, n. 21, p. 21588-21595, set. 2019.

TELSER, J. A perspective on applications of ligand-field analysis: inspiration from Electron Paramagnetic Resonance Spectroscopy of coordination complexes of transition metal ions. **Journal of the Brazilian Chemistry Society**, v. 17, n. 8, p. 1501-1515, 2006.

TELSER, J.; KRZYTEK, J.; OZAROWSKI, A. High-frequency and high-field electron paramagnetic resonance (HFEPFR): a new spectroscopy tool for bioinorganic chemistry. **Journal of Biological Inorganic Chemistry**, v. 19, p. 297-318, 2014.

WELLER, M. *et al.* **Química Inorgânica**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

VAZ, M.G. F. *et al.* Compostos magnéticos moleculares – o desenvolvimento de novos materiais magnéticos nanoestruturados. **Química Nova**, v. 33, n. 8, p. 1756-1764, ago. 2010.

VILLAREAL, M. A. *et al.* Síntesis, caracterización estructural y magnética de la aleación $\text{CuAl}_{0,67}\text{Cr}_{0,33}\text{S}_2$. **Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales**, Caracas, v. 32, n. 2, dez. 2012.