ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DIELÉTRICO DE UM NANOFLUIDO COM PARTÍCULAS FERROELÉTRICAS EM ESCALA NANOMÉTRICA E SUB-MICROMÉTRICA

L. O SALMAZO⁽¹⁾, S. A. DANTAS⁽¹⁾, F. S. BELLUCCI⁽¹⁾, S. LANFREDI⁽¹⁾, GOUVEA, D⁽²⁾, M. A. L. NOBRE⁽¹⁾ ⁽¹⁾Departamento de Física, Química e Biología – DFQB, Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Presidente Prudente – SP, Brasil. ⁽²⁾ Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais Universidade de São Paulo, Escola Politécnica,Cidade Universitária CEP: 05508-900, São Paulo, SP - Brasil e-mail: lesalmazo@yahoo.com.br

Resumo

Suspensões cerâmicas podem conter partículas com uma ampla gama de tamanhos desde 10⁻⁹ m até 10⁻⁹ m. De particular interesse são as suspensões contendo nanopartículas (10⁻⁹ m), chamadas de nanofluídos, as quais tem grande potencial na área de nanotecnologia e nanociências. O presente trabalho tem como objetivo investigar as propriedades dielétricas de nanofluídos com partículas nanométricas (54 nm) e submicrométricas (220 nm) do óxido ferroelétrico com estequiometria KSr₂Nb₅O₁₅ via espectroscopia de impedância. As medidas foram realizadas em freqüências no intervalo entre 5Hz e 13MHz, em nanofluídos contendo 1% em peso de nanopartículas. Uma célula de medida para líquido tipo capacitor coaxial foi utilizada. Os parâmetros elétricos resistência e capacitância dos nanofluídos foram obtidos por ajustes teórico dos diagramas de impedância via modelagem através de circuitos elétricos equivalentes. Os valores para permissividade estática, permissividade infinita e "dielectric strength" dos nanofluídos foram calculados. Mudanças nos parâmetros permissividade dielétrica e condutividade em função da freqüência para distintos tamanhos de nanopartícula são discutidos.

Palavras chave: Suspensão cerâmica; Nanofluído; Nanopartículas; Espectroscopia de impedância; Permissividade dielétrica; Resistência dielétrica

INTRODUÇÃO

As suspensões cerâmicas podem conter partículas com uma ampla gama de tamanhos desde 10⁻⁹ m até 10⁻³ m. Em particular, suspensões contendo nanopartículas (10⁻⁹ m) podem ser chamadas de nanofluídos. Nanofluídos têm mostrado propriedades relevantes, quando comparadas a fluídos isentos de nanopartículas, como o aumento dos parâmetros condutividade térmica ⁽¹⁾.

Destacando-se ainda em resfriamento de circuitos integrados, novos revestimentos superficiais, aplicações farmacêuticas e obtenção de incrementos de condutividade térmica visando o aumento da eficiência energética ⁽²⁾. Nanofluídos podem ser preparados com partículas nanométricas (< 100 nm) apresentando propriedades térmicas de melhor desempenho que o próprio fluído. Uma caracterização de nanofluídos envolvendo ensaios não destrutivos e não desnaturadores está baseada na caracterização elétrica e dielétrica. Um dos principais interesses no estudo do comportamento dielétrico de nanofluídos é a dependência da constante dielétrica com a freqüência do campo elétrico aplicado, bem como a dissipação de energia em determinadas freqüências. Novas propriedades podem então ser descobertas. A técnica de espectroscopia de impedância tem sido utilizada na caracterização de líquidos ⁽³⁾, cerâmicas semicondutoras ⁽⁴⁾, cerâmicas ferroelétricas ⁽⁵⁾ e antiferroelétricas ⁽⁶⁾.

Este trabalho tem como objetivo investigar as propriedades elétricas de nanofluídos com partículas nanométricas e sub-micrométricas de KSr₂Nb₅O₁₅ (KSN) sintetizada pelo Método Poliol Modificado, via espectroscopia de impedância em freqüência de 5Hz a 13MHz.

MATERIAIS E MÉTODOS

Preparação das nanopartículas de KSr₂Nb₅O₁₅

Neste trabalho, nanopartículas do óxido niobato de potássio estrôncio com estequiometria KSr₂Nb₅O₁₅ (KSN)⁽⁷⁾, foram preparadas através do Método Poliol Modificado⁽⁸⁻¹⁰⁾. Tal método apresenta como vantagens à presença de reduzida fração orgânica e a possibilidade de preparação de quantidades razoáveis de material em uma batelada. Também, um pequeno número de etapas de preparação, insumos de baixo custo e possibilidade de preparação de nanopós nanocristalinos.

A fórmula molecular, peso molecular e origem dos reagentes utilizados na síntese da fase KSN através do MPM estão listados na Tabela I.

Nome	Fórmula Química	Peso Molecular	Origem
Ácido Nítrico	HNO ₃	63,01	NUCLEAR
Carbonato de Estrôncio	SrCO₃	147,63	VETEC
Carbonato de Potássio	K ₂ CO ₃	138,21	VETEC
Etilenoglicol	HOCH ₂ CH ₂ OH	62,07	NUCLEAR

Tabela I. Características dos reagentes utilizados na síntese da fase KSN pelo MPM.

Todos os reagentes de partida foram dissolvidos em ácido nítrico e em seguida foi adicionado etilenoglicol, $C_2H_6O_2$ (NUCLEAR) ao sistema aquecido até próximo de 300 °C em um agitador magnético, gerando o precursor que posteriormente foi calcinado a 450 e 1150 °C por 1 hora com taxa de aquecimento de 5 °C/min, em atmosfera de O_2 .

O tamanho de partícula foi determinado utilizando a técnica de medida da área superficial específica por isotermas de adsorção/dessorção de N₂ pela técnica de Brunauer–Emmett–Teller (BET). De acordo com a equação (B), valores de D_{BET} iguais a 54,0 nm e 220 nm foram obtidos para o pó precursor de KSN calcinado durante 1h a 450°C e a 1150°C, respectivamente.

Preparação das suspensões

As suspensões de partículas foram preparadas utilizando o 2-butoxietanol como fluido hospedeiro para partículas. Foram adicionadas 1% em peso de partículas ao fluido, sendo a mistura homogeneizada em ultra-som durante 30s.

Periférico de caracterização elétrica

A célula de caracterização dielétrica para líquidos e nanofluídos possui geometria cilíndrica e forma um capacitor do tipo coaxial ⁽¹¹⁾. A célula é constituída de 6 peças cilíndricas de alumínio e nylon. O eletrodo externo no formato de um copo, o anel interno, o eletrodo interno e o anel de guarda, responsável pelo aterramento são feitos em alumínio. Em nylon têm-se a base para o eletrodo interno e a tampa da célula além de 2 anéis de isolamento acoplados ao anel interno e ao anel de guarda.

A Figura 1 mostra (a) a célula de caracterização dielétrica fechada e (b) suas partes internas.



Figura 1. Fotografia **a**) célula de medida de permissividade dielétrica, A fotografia mostra o eletrodo interno (parte metálica no centro do sistema), o eletrodo externo (parte metálica maior que é a base do sistema) e o pino do anel de guarda próximo ao eletrodo interno.**b**) suas peças constituintes.

O parâmetro fator geométrico A que caracteriza a célula de medidas elétricas e dielétricas para nanofluídos é determinado pela equação (A):

$$\Lambda = \frac{2.\pi.L}{\ln\left(\frac{R_E}{R_i}\right)} \tag{A}$$

onde R_i é o raio da armadura cilíndrica interna, R_E é o raio da armadura cilíndrica externa e L representa o comprimento das armaduras da célula de caracterização. O conjunto de anéis utilizado nas medidas proporcionaram um espaçamento entre os eletrodos de 5 mm com um fator geométrico $\Lambda = 0.3324m$.

As medidas de impedância dos nanofluídos foram realizadas à temperatura ambiente. Tal impedância é um valor aparente, uma vez que compõem-se da soma da impedância do fluído (Z_F^*), impedância das nanopartículas $Z_{NP}^*(\omega)$ e eventualmente outras contribuições.

Os dados foram plotados no plano complexo $Z'(\omega)$ versus $Z''(\omega)$ e foram analisados utilizando-se "Circuitos Elétricos Equivalentes" pelo programa numérico EQUIVCRT ⁽¹²⁾.

Medida de Área Superficial (BET)

O tamanho de partícula ou diâmetro médio esférico equivalente foi calculado através da equação (B):

$$S_{esp} = \frac{6}{\rho D}$$
(B)

onde, S_{esp} é a superfície específica, ρ a densidade teórica e D o diâmetro médio equivalente esférico.

Espectroscopia de impedância

A caracterização elétrica dos nanofluídos foi realizada por espectroscopia de impedância ⁽¹³⁾ em um impedancímetro Novocontrol modelo α -analyser. As medidas foram realizadas de 5 Hz a 13 MHz com um potencial de 500 mV entre as armaduras da célula, a temperatura ambiente.

A espectroscopia de impedância, técnica de caracterização elétrica em corrente alternada, consiste em submeter uma amostra a uma tensão senoidal de amplitude fixa (V_0) do tipo $V(t) = V_0 \exp j \omega t$, onde $\omega = 2\pi f$ é a freqüência angular, e monitora-se como resposta a corrente em função do tempo.

A corrente é dada na forma $I(t) = I_0 \exp j(\omega t + \varphi)$, onde é I_0 é a amplitude máxima da corrente e φ é o ângulo de fase entre a tensão e a corrente. Dessa forma, valores de impedância, $Z^*(\omega)$, são obtidos de acordo com a equação (C):

$$Z^{*}(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = \frac{V_{0} \exp(j\omega t)}{I_{0} \exp j(\omega t + \varphi)} = |Z^{*}| \exp(-j\varphi)$$
(C)

Desde que $Z^*(\omega)$ é um número complexo, o mesmo pode ser representado em coordenadas cartesianas de acordo com a equação (D):

$$Z^{*}(\omega) = \operatorname{Re}(Z^{*}) + j\operatorname{Im}(Z^{*})$$
(D)

onde $Re(Z^*)$ e $Im(Z^*)$ são as partes real e imaginária da impedância, respectivamente, e *j* é o operador imaginário.

Em geral, $Z^*(\omega)$ é uma resposta aparente, desde que representa uma soma de contribuições das componentes eletroativas no sistema caracterizado. Assim, a impedância de um nanofluído $Z^*_{NF}(\omega)$ pode ser escrita, *a priori*, como a soma da contribuição do fluído $Z^*_{F}(\omega)$ e das nanopartículas $Z^*_{NP}(\omega)$ como: $Z^*_{NF}(\omega) = Z^*_{F}(\omega) + Z^*_{NP}(\omega)$.

Os diagramas de impedância são modelados considerando-se a resposta elétrica de associações de circuitos elétricos *RC*, submetidos a uma diferença de potencial senoidal. Assim, a resposta elétrica pode ser modelada através de circuitos elétricos equivalentes, via programas como o EQUIVCRT. Cada circuito da associação, RC, corresponde à contribuição de uma componente eletroativa.

A teoria mais utilizada para a análise do diagrama de impedância em meios líquidos segue a teoria de Debye ⁽¹⁴⁾ a qual descreve a resposta elétrica de um sistema nos casos em que o centro do semicírculo coincide com o eixo das abscissas.

A análise teórica desse caso pode ser representada pela equação (E):

$$\varepsilon^{*} - \varepsilon_{\infty} = \frac{\varepsilon_{s} - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)} = \begin{cases} \varepsilon' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_{s} - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^{2}} \\ \varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_{s} - \varepsilon_{\infty})(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau)^{2}} \end{cases}$$
(E)

onde ε_S e ε_{oo} representam a permissividade estacionária e a permissividade a freqüência infinita respectivamente.

A condutividade complexa $\sigma^{*}(\omega)$ pode ser definida de acordo com a equação (F).

$$\sigma^{*}(\omega) = \frac{1}{\Lambda Z^{*}(\omega)} = \sigma'(\omega) - j\sigma''(\omega) = \begin{cases} \sigma' = \omega \varepsilon_{0} \varepsilon''(\omega) \\ \sigma'' = \omega \varepsilon_{0} \varepsilon'(\omega) \end{cases}$$
(F)

Representação conveniente uma vez que permite determinar a condutividade de nanofluídos representada por $\sigma'(\omega)$, onde ε_0 representa a permissividade do vácuo.

A permissividade infinita (ε_{oo}) é obtida através da curva da permissividade real a freqüência de 1 MHz e a permissividade estática (ε_S) através da equação (G).

$$\frac{1}{2}(\mathcal{E}_{S} - \mathcal{E}_{\infty}) = \mathcal{E}^{"}(\boldsymbol{\omega}_{máx})$$
(G)

 ω_{max} representa a freqüência angular em que a curva da componente imaginária da impedância é máxima.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 mostra os diagramas de impedância dos nanofluídos contendo nanopartículas de KSN com dimensão de 54 nm e 220 nm, com as respectivas curvas de ajuste teórico. Os pontos no diagrama representam os dados experimentais e a linha contínua o ajuste teórico. Um excelente ajuste foi obtido entre os dados teóricos e o ajuste. Como esperado, na região de freqüência analisada, apenas uma contribuição (resposta aparente) pode ser observada para ambos os nanopós. Tal comportamento é esperado quando a razão entre freqüência de relaxação das componentes eletroativas é inferior a três ordens de grandeza. A resposta elétrica foi modelada através de um circuito elétrico equivalente tipo (*RC*) em paralelo. Os valores calculados de resistência (*R*_{NF}), capacitância (*C*_{NF}) e freqüência de relaxação (f_0^{NF}) para os nanofluídos são listados na Tabela II. O parâmetro f_0^{NF} , $f_0^{NF} = 1/2\pi R_{NF}C_{NF}$, contendo KSN com 54 nm é maior que o do nanofluído contendo KSN com 220 nm. Tal fenômeno é observado em decorrência da maior população de dipolos e maior densidade de carga superficial das nanopartículas permitindo uma maior quantidade de fluído adsorvido ou organizado na superfície reduzindo assim a resistência aparente do nanofluído.



Figura 2. Curva teórica e experimental dos nanofluídos com nanopartículas de 54 e 220 nm.

TabelaII.Parâmetrosresistênciaecapacitância dos nanofluídos.

Parâmetros	Nanofl	uídos
Físicos	KSN-220	KSN-54
R_{NF} (kΩ)	62,06	28,34
* C_{NF} (pF)	95,50	85,07
f₀^{NF} (kHz)	25,03	65,05

* A capacitância para ambas as amostra é ideal, de acordo com a teoria de Debye.

Dados do butoxietanol: R_{BTXOL} = 85,4 kΩ, C_{BTXOL} = 32,5 pF e f_o^{BTXOL} = 57,4 KHz.

De acordo com a discussão da Fig. 2, os fluídos caracterizados exibem um comportamento tipo Debye, de acordo com a equação (H):

$$Z^{*}(\omega) = Z_{\omega} + \frac{(R_{s} - R_{\omega})}{1 + (j\omega\tau)} = Z'(\omega) - jZ''(\omega) = \begin{cases} Z'(\omega) = R_{\omega} + \frac{(R_{s} - R_{\omega})}{1 + (\omega\tau_{i})^{2}} \\ Z''(\omega) = -\frac{(R_{s} - R_{\omega})(\omega\tau)}{1 + (\omega\tau_{i})^{2}} \end{cases}$$
(H)

A resposta elétrica foi modelada através de um circuito elétrico equivalente tipo (RC) em paralelo. Os valores calculados de resistência (R_{NF}), capacitância (C_{NF}) e freqüência de relaxação (f_0^{NF}) para os nanofluídos são listados na Tabela II. O parâmetro f_0^{NF} , $f_0^{NF} = 1/2\pi R_{NF}C_{NF}$, contendo KSN com 54 nm é maior que o do nanofluído contendo KSN com 220 nm. A análise dos parâmetros freqüência de relaxação mostra que elas obedecem a seguinte seqüência: $f_0^{NF(54)} > f_0^{F} > f_0^{NF(220)}$. O efeito da adição de naopartículas sobre o fluído é diminuir a resistência do fluído, o que é compatível com o aumento do número de portadores disponíveis. Neste sentido, nanopartículas de 220 nm, provocam um fenômeno equivalente ao aumento do número de portadores do fluído puro, porém nanopartículas de 54 nm provocam um aumento ainda maior. Isto indica que existe interação entre fluído e superfície de nanopartículas.

A Figura 3 mostra o gráfico da permissividade real (ϵ ') e imaginária (ϵ '') calculadas através da seguinte relação:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= z'' / |z^*| \omega \epsilon_0 \Lambda \end{aligned} \tag{I} \\ \epsilon'' &= z' / |z^*| \omega \epsilon_0 \Lambda \end{aligned} \tag{J}$$

onde |z*| é o módulo da impedância, em função da freqüência de medida dos nanofluídos contendo KSN com dimensão de 54 e 220 nm. A parte real da permissividade apresenta um comportamento dispersivo com a freqüência para ambos os nanofluídos. O fenômeno ocorre para freqüências abaixo de cerca de 100 Hz para o nanofluído contendo KSN (220 nm) e 300 Hz para o nanofluído contendo KSN (54 nm), em freqüência maiores passa a apresentar um comportamento não dispersivo. Nanofluído com KSN – 54 nm possui maior grau de dispersão que aquele com KSN – 220 nm. Considerando líquidos polares e o domínio de baixas freqüências, o fenômeno de dispersão pode estar associado à condutividade ou a polarização da interface metal/líquido. A parte imaginária da permissividade decresce linearmente com o aumento da freqüência para ambos os nanofluídos.



Figura 3. Curvas da permissividade real (ε) e imaginária (ε) para os nanofluídos.

Tabela III. Valores da permissividade real
(ɛ') e imaginária (ɛ'') para os nanofluídos.

	Nanofluído			
f (Hz)	KSN (2	20 nm)	KSN (5	4,0 nm)
	ε'	ε"	ε'	ε"
10	2,0x10 ²	3,0x10 ⁴	1,5x10 ³	6,0x10 ⁴
10 ²	1,8x10 ¹	3,4x10 ³	5,3x10 ¹	7,0x10 ³
10 ³	1,3x10 ¹	3,2x10 ²	1,3x10 ¹	6,9x10 ²
10 ⁴	1,2x10 ¹	3,6x10 ¹	1,2x10 ¹	7,8x10 ¹
10 ⁵	1,2x10 ¹	3,6	1,1x10 ¹	7,5
10 ⁶	1,2x10 ¹	0,4	1,1x10 ¹	0,9

A Figura 4 mostra a evolução da condutividade elétrica dos nanofluídos em função da freqüência. A condutividade elétrica é função da freqüência em todo o intervalo de freqüência caracterizado. Para freqüências abaixo de 100,0 Hz e 40,0 Hz observa-se um aumento da condutividade com a diminuição da freqüência para o nanofluído contendo KSN (54 nm) e o nanofluído contendo KSN (220 nm), respectivamente. Este fenômeno está associado à uma contribuição de fenômeno na interface metal/fluído (butoxietanol). A adição de nanopartículas modula as características do nanofluído.



Tabela IV. Valores de condutividade elétrica (σ) para os nanofluídos em função da freqüência.

	σ (Ω.m)		
Frequência	KSN (220	KSN (54,0 nm)	
	nm)	'	
1 kHz	6,4x10 ⁻⁷	7,1x10 ⁻⁷	
10 kHz	6,3x10 ⁻⁶	6,1x10 ⁻⁶	
100 kHz	5,5x10 ⁻⁵	6,3x10 ⁻⁵	
1 MHz	5,7x10 ⁻⁴	6,6x10 ⁻⁴	

Figura 4. Condutividade elétrica (σ) dos nanofluídos em função da freqüência a temperatura ambiente.

De acordo com a Fig. 4, a polarização interfacial é operacional para o domínio de baixas freqüências. As curvas de condutividade versus freqüência sugerem que uma transição entre o domínio da polarização interfacial e condutividade a.c. ocorre a 40 e 100 Hz, para KSN (220 nm) e KSN (54 nm), respectivamente. Para o fluído butoxietanol tal evento ocorre ao redor de 25 Hz. Ainda, todas as curvas, em freqüências abaixo da freqüência associada à freqüência de transição possuem um mesmo coeficiente de inclinação. Este fenômeno sugere que uma mesma espécie interage na superfície, porém o seu aumento é modulado pelas nanopartículas.

A Tabela V mostra os valores de ε_S e ε_{oo} para os nanofluídos KSN (54 nm) e KSN (220 nm). A magnitude dos parâmetros permissividade estática (ε_S) e permissividade infinita (ε_{oo}) foram determinadas de acordo com a equação (G).

	KSN (220 nm)	KSN (54,0 nm)
٤s	36,4	32,63
€∞	11,7	11,13

Tabela V. Valores de $\varepsilon_S e \varepsilon_{oo}$ para os nanofluídos contendo nanopartículas de KSN.

O parâmetro resistência dielétrica (*dielectric strength*) ($\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$) para o nanofluído contendo KSN (54 nm) é igual a 21,5 e para o nanofluído contendo KSN (220 nm) é igual a 24,7. A magnitude dos parâmetros ($\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$) sugere que a natureza de ambos os processos de polarização do fluído e das nanopartículas com diferentes tamanhos são dipolares.

CONCLUSÕES

A técnica de espectroscopia de impedância e o ajuste de curva via circuitos elétricos equivalentes constituem-se em ferramentas flexíveis para a caracterização elétrica e dielétrica de nanofluídos. A adição de partículas ao fluído modula diversas propriedades do fluído. Um fenômeno tipo efeito-de-tamanho de nanopartículas do óxido ferroelétrico afeta diversos parâmetros do nanofluído como a freqüência de relaxação, *dielectric strength* e condutividade d.c. O parâmetro freqüência de relaxação do nanofluído contendo hanopartículas KSN com 54 nm, é maior que aquele do nanofluído contendo KSN com 220 nm, compatível com o menor *dielectric strength* do nanofluído com nanopartículas de 54 nm. A evolução dos parâmetros elétricos mostra que existe um fenômeno de adsorção do fluido nas nanopartículas.

REFERÊNCIAS

(1) YOU, S. M.; KIM, J. H.; KIM, K. H. Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer. *App. Phys. Lett.*, v. 83, p. 3374-3376, 2003

(2) VAFAEI, S.; BORCA-TASCIUC, T.; PODOWSKI, M. Z.; PURKAYADTHA, A.; RAMANATH, G.; AJAYAN, P. M. Effect of Nanoparticles on Sessile Droplet Contact Angle. *Nan.*, v. 17, p. 2523-2527, 2006.

(3) PUZENKO, A.; HAYASHI, Y.; RYABOV, Y. E.; BALIN, I.; FELDMAN, Y.; KAATZE, U.; BEHRENDS, R. Relaxation Dynamics in Glycerol-Water Mixtures: I. Glycerol-Rich Mixtures. *J. Phys. Chem. B*, v.109, p. 6031-6035, 2005.

(4) NOBRE, M. A. L.; LANFREDI, S. New evidence of grain boundary phenomenon in Zn₇Sb₂O₁₂ ceramic: an analysis by impedance spectroscopy. *Mat. Lett.*, v.50, n.5-6, p. 322, 2001.

(5) NOBRE, M.A.L.; LANFREDI, S. Phase Transition in Sodium-Lithium Polycrystal: An Overview Based on Impedance Spectroscopy. **J.** *Phys and Chem Sol*, v.62, n.11, p. 1999-2006, 2001.

(6) NOBRE, M.A.L.; LANFREDI, S. A.c. Conductivity and Conduction Mechanism of NaNbO₃ Semiconductor Antiferroelectric Ceramic: a Relaxational Approach at High Temperature. *App. Phys. Lett.*, v.83, n.13, p.3102-3104, 2003.

(7) LANFREDI, S.; TRINDADE, L. R.; BARROS, A. R.; FEITOSA, N. R.; NOBRE, M. A. L. Síntese e Caracterização Estrutural de Niobato de Potássio Estrôncio com Estrutura tipo Tetragonal Tungstênio Bronze TTB. *Cerâmica*, v.51, p.151-156, 2005.

(8) XU, Y.; HUANG, G.; LONG, H. Synthesis of Lanthanum Aluminate through the Ethylenediaminetetraacetic Acid Gel Route. *Ceramic Int.*, v.29, p.837-840, 2003.

(9) FIET, F.; LAGIER, J.P.; FIGLRZ, M. Preparing Monodisperse Metal Powders in Micrometer and Submicrometer Sizes by the Polyol Process. **J.** *Mat. Educ.*, v.13, p.79-94, 1991.

(10) FIEVET, F.; LAGIER, J. P.; FIGLARZ, M. Preparing Monodisperse Metal Powders in Micrometer and Submicrometer Sizes by the Polyol Process. *Mat. Res. Bull*, v.32-33, p. 29-34, 1989.

(11) BELLUCCI, F.S.; SALMAZO, L. O.; NOBRE, M. A. L. Development and Calibration of a Measurement cell for Characterization of Nanometrics and Nanostructures Powders by Impedance Spectroscopy. **In: 52nd Brazilian Congress of Ceramic,** Florianópolis, SC, 2008.

(12) B.A. Boukamp, Equivalent circuit—EQUIVCRT Program-Users Manual, v 3., p. 97, University of Twente—Holand, 1989.

(13) NOBRE, M. A. L.; LANFREDI, S. New evidence of grain boundary phenomenon in Zn₇Sb₂O₁₂ ceramic: an analysis by impedance spectroscopy. *Mat. Lett.*, v.50, n.5-6, p. 322, 2001.

ANALYSIS OF THE DIELECTRIC BEHAVIOR OF A NANOFLUID WITH FERROELECTRIC PARTICLES IN NANO AND SUB-MICROMETRIC SCALE

Abstract

Ceramic suspensions can be prepared from a broad range of particle sizes from 10^{-9} to 10^{-3} m. In specific, suspensions of nanoparticles (10^{-9} m) are called of nanofluids which exhibits a great potential of application in advanced areas as nanotechnology and nanosciences. This work is directed to the investigation of dielectrical properties of nanofluids with nanoparticles of ferroelectric oxide with KSr₂Nb₅O₁₅ stoichiometry via impedance spectroscopy. Measurements were carried out in the frequency range of 5Hz to 13MHz, with concentration of 1% by weight. A sample holder for liquid type coaxial capacitor was used. Electric parameters of resistance and capacitance of nanofluids were derived through of theoretical adjust of impedance diagrams via equivalent electrical circuits. Both static permittivity and infinite permittivity of the nanofluid are derived. Changing in parameters dielectric permittivity and conductivity of nanofluids as a function of frequency depending on the nanoparticle size is discussed.

Keywords: Ceramic suspension; Nanofluid; Nanoparticle; Impedance spectroscopy; Dielectric permittivity; Dielectric strength.