

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Atividades de Pesquisa  
Formulário de Tramitação e Registro**

Situação: **Aprovação/Depo Coordenador**  
Protocolo nº: **2012.1153**

Título:	Medidas elétricas em filmes metálicos ultrafinos aplicados em materiais absorvedores de radiação eletromagnética
Resumo:	Este projeto se propõe iniciar atividades experimentais de pesquisa científica em Física da Matéria Condensada e Nanotecnologia, em tema relacionado à área de Engenharia de Materiais. O objetivo é abordar a atuação de filmes metálicos de espessura da ordem de 10 nm como absorvedor de radiação na região de microondas. Neste sentido, se pretende obter condições de estudar o comportamento da condução elétrica nestas estruturas, através da confecção de um arranjo de 4 pontas para medidas elétricas de resistividade elétrica e comportamento da corrente em função da voltagem. Estudar a relação entre a espessura dos filmes metálicos ultrafinos, a resistividade elétrica, a densidade de defeitos e a absorção de radiação é fundamental para o entendimento deste mecanismo físico, e está relacionado com aplicações tecnológicas de extrema relevância estratégica.
Palavras chave: (máximo 5)	Filmes Finos; Resistividade elétrica; Materiais absorvedores; Microondas
Grande Área do conhecimento:	Ciências Exatas e da Terra
Área do conhecimento:	Física da Matéria Condensada
Nome do Grupo de Pesquisa: (CNPq - Diretório)	Grupo de Física Aplicada a Mobilidade
Está vinculado a outro projeto de pesquisa?	
Período de realização:	06/09/2013 a 01/01/2015
A atividade receberá algum aporte financeiro?:	Sim
Orçamento Total:	R\$ 59286,00
Financiador:	Outro
Especificar financiador:	FAPESC
Propriedade Intelectual (o resultado do projeto é ou poderá ser protegido por):	

■ ■ ■ **Envolvidos neste projeto de pesquisa**

<b>Coordenador</b>	
Nº do SIAPE:	2346577
Nome do Coordenador:	RAFAEL GALLINA DELATORRE
CPF do Coordenador:	2108845925
Departamento:	CAMPUS DE JOINVILLE
Centro:	CAMPUS DE JOINVILLE
Regime de trabalho:	DE
Fone de contato:	4734615900
E-mail:	rafael.delatorre@joinville.ufsc.br
Carga horária semanal nesta atividade:	0 horas
Receberá remuneração nesta atividade de pesquisa?	Não

Você gostaria de participar do guia de	Não
--	-----

fontes da UFSC?	
-----------------	--

Outros prof. ou servidores da UFSC envolvidos?	Sim
--	-----

Alunos da UFSC envolvidos?	Sim
----------------------------	-----

Pessoas externas à UFSC envolvidas?	
-------------------------------------	--

<b>No documents found</b>
---------------------------

Outras Considerações
----------------------

Nº do Processo:	2012.1153
-----------------	-----------



**Universidade Federal de Santa Catarina**  
**Centro de Engenharia da Mobilidade**  
**Campus Joinville**

**Projeto de Pesquisa**

Medidas elétricas em filmes metálicos ultrafinos aplicados em  
materiais absorvedores de radiação eletromagnética

**Rafael Gallina Delatorre**  
Matrícula número 173252

Joinville, Setembro de 2013

## Resumo

Este projeto se propõe realizar atividades experimentais de pesquisa científica em Física da Matéria Condensada e Nanotecnologia, em tema relacionado à área de Engenharia de Materiais. O objetivo é abordar a atuação de filmes metálicos de espessura da ordem de 10 nm como absorvedor de radiação na região de microondas. Neste sentido, se pretende obter condições de estudar o comportamento da condução elétrica nestas estruturas, através da confecção de um arranjo de 4 pontas para medidas elétricas de resistividade elétrica e comportamento da corrente em função da voltagem. Estudar a relação entre a espessura dos filmes metálicos ultrafinos, a resistividade elétrica, a densidade de defeitos e a absorção de radiação é fundamental para o entendimento deste mecanismo físico, e está relacionado com aplicações tecnológicas de extrema relevância estratégica.

## Descrição da problemática

A Nanotecnologia é um ramo bastante influente atualmente nas pesquisas em ciência fundamental e em novas tecnologias. Neste tema, um dos focos é o controle da preparação de estruturas onde ao menos uma das dimensões é da ordem de nanômetros (nm), e a medição de propriedades destas estruturas, de ordem física, química ou biológica. Destas propriedades, as propriedades elétricas são particularmente importantes tanto do ponto de vista científico, envolvendo o entendimento de fenômenos de transporte em nível nanométrico, quanto tecnológico, no desenvolvimento de novos sensores, atuadores, e dispositivos. Existe muita expectativa nos estudos no tema da nanotecnologia, principalmente no desenvolvimento de novas estruturas que possam ultrapassar a tecnologia atual, ou criar uma forma alternativa de tecnologia.

Em termos de inovação tecnológica, um dos focos mais promissores da nanotecnologia em áreas da Engenharia é o de novos sensores e atuadores, com propriedades e aplicações alternativas. Estruturas denominadas de Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos (*Micro-Electro-Mechanical Systems* - MEMs) representam a busca pela miniaturização dos sistemas mecânicos, estudando, em muitos casos, o emprego de estruturas nanométricas como parte constituinte na confecção de sistemas miniaturizados. Nestes estudos, as propriedades destes sistemas mecânicos miniaturizados é totalmente dependente dos materiais empregados como sensores, atuadores ou na

geração de energia para o sistema. Por exemplo, materiais piezoelétricos, termoelétricos e fotosensíveis se destacam por suas potenciais aplicações no controle eletrônico da posição, velocidade, pressão, temperatura, e na geração de energia.

Os materiais absorvedores de radiação eletromagnética, ou MARE, são utilizados em diversas aplicações tecnológicas atuais, onde podemos destacar sua relevância em áreas como telecomunicações, automobilística ou aeronáutica. Devido à relevância em áreas estratégicas, o acesso à esta tecnologia é bastante limitado. O mecanismo básico envolvido nesta absorção trata da transformação de energia eletromagnética em energia térmica, através da conversão da radiação em algum mecanismo de troca de calor [1, 2]. Em filmes ultrafinos, a taxa de absorção de radiação de microondas aumenta consideravelmente. Dados experimentais e modelos teóricos indicam que esta propriedade de filmes ultrafinos está associada a uma combinação entre condutividade elétrica elevada do metal e alta densidade de defeitos. Estudar a relação entre a espessura de filmes metálicos, a resistividade, a absorção de radiação e o controle da densidade de defeitos é fundamental para o entendimento deste mecanismo físico, e está relacionado com aplicações tecnológicas de extrema relevância estratégica.

## **Objetivos e metas**

Os objetivos com a execução deste projeto são:

- 1) Projetar e elaborar um arranjo experimental para realizar medidas elétricas em materiais planares ou na forma de filme fino, mais especificamente, obter valores de resistividade em materiais de elevada condutividade elétrica, e o comportamento da corrente elétrica em função da intensidade de voltagem aplicada.
- 2) Estudar o comportamento da resistividade de materiais metálicos na forma de filme fino com espessuras ultrafinas, ou seja, na ordem de 10 nm, e como a densidade de defeitos nestes materiais influencia no valor da resistividade.

## Revisão bibliográfica

Materiais metálicos são conhecidos como refletores de radiação eletromagnética. Esta característica está relacionada às propriedades elétricas dos metais, que garantem que o campo elétrico na superfície é nulo [3-5]. Entretanto, para espessuras ultrafinas, da ordem de nanômetros, a taxa de absorção de radiação de microondas aumenta consideravelmente, tornando filmes metálicos ultrafinos bastante atrativos para a confecção de materiais absorvedores de radiação neste comprimento de onda [6-10]. Dados experimentais e modelos teóricos indicam que estas propriedades de filmes ultrafinos estão associadas a uma combinação entre condutividade elétrica elevada do metal e alta densidade de defeitos. A ação conjunta da condutividade elevada e da baixa espessura promovem a absorção da radiação e a geração de correntes elétricas superficiais, que são espalhadas nos defeitos existentes em filmes desta ordem de espessura, transformando a energia da onda eletromagnética incidente em energia térmica por efeito Joule. Para isso, a espessura do material deve ser reduzida para valores abaixo da profundidade de penetração da onda no material [11, 12]. O estudo da absorção de microondas por filmes metálicos ultrafinos é um assunto pouco abordado na revisão bibliográfica realizada até o momento, porém de grande importância tecnológica, onde se encontraram poucos trabalhos, relacionados exclusivamente a filmes de ouro (Au) [6-10].

A condutividade elétrica em metais, ou seu inverso numérico que é a resistividade elétrica, pode ser analisada através da Lei de Mathiessen, que informa que cada processo de espalhamento eletrônico adiciona uma quantidade ao valor da resistividade, resumido pela equação 1 [13],

$$\rho = \rho_i + \sum_j \rho_j \quad \text{Equação 1}$$

sendo  $\rho_i$  a resistividade "ideal" do metal, sem defeitos ou impurezas, e  $\rho_j$  a resistividade associada a cada forma de espalhamento que atua no material. Dentre as formas de espalhamento possíveis, pode-se destacar a reflexão nas paredes do material, ou interfaces, a reflexão em impurezas e defeitos existentes na rede cristalina, reflexão em fônons e nos contornos de grão. A reflexão nas bordas do material é um processo relacionado às dimensões do mesmo, indicando a adição de componentes na resistividade para materiais de dimensões nanométricas. De uma maneira geral, o valor da resistividade tende a aumentar quando a espessura se aproxima do livre caminho médio dos

elétrons. A medida da resistividade em filmes metálicos ultrafinos indica o aumento monotônico com o decréscimo da espessura, quando esta atinge valores da ordem de dezenas de nanômetros, como ilustra a Figura 1 retirada do trabalho de Liu e colaboradores em medidas em filmes finos de cobre (Cu) [14]. Nesta ordem de grandeza outros fatores também são relevantes na interpretação do comportamento da resistividade, como a existência de defeitos, que emergem devido a formação de camadas inomogêneas, formadas pela união de ilhas de material.

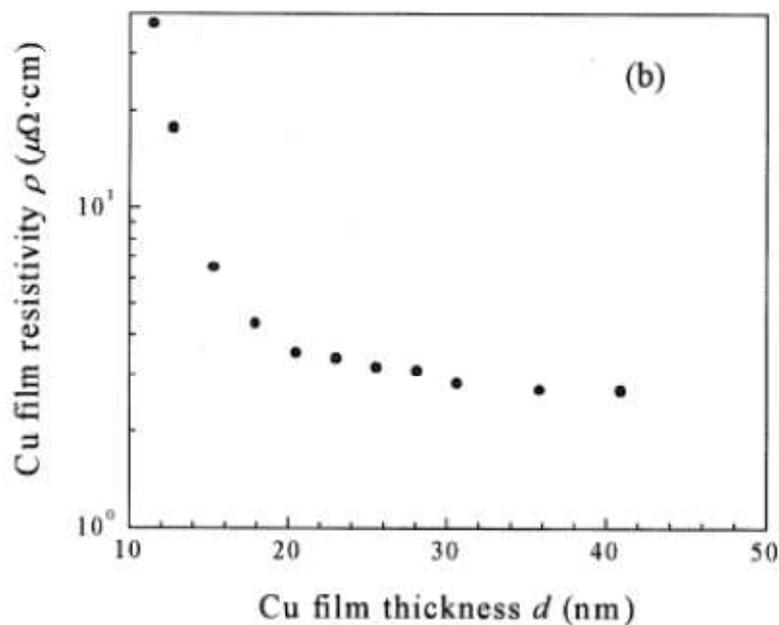


Figura 1: Medidas de resistividade em filmes de cobre em função da espessura [14].

Existem algumas técnicas possíveis para avaliar o valor da resistividade elétrica de materiais [15]. O método de 4 pontas em linha é conhecido por eliminar da precisão da medida a resistência do contato das pontas de prova com a amostra. Esta característica é particularmente importante em materiais de elevada condutividade elétrica. Nesta técnica, a resistividade é baseada no valor de resistência elétrica medido em um sistema de aplicação de corrente e medição de voltagem com 4 pontas de prova colocadas em linha. Neste caso, a corrente é aplicada entre as pontas externas e a voltagem é medida entre as pontas internas, o que garante a eliminação da resistência envolvida no contato com a superfície da amostra. Um exemplo de medida de resistividade, em arranjo experimental utilizando a técnica de 4 pontas em linha, montado pelo proponente durante o mestrado, está apresentado na Figura 2 para o caso de ligas de CuNi na forma de filme fino [16].

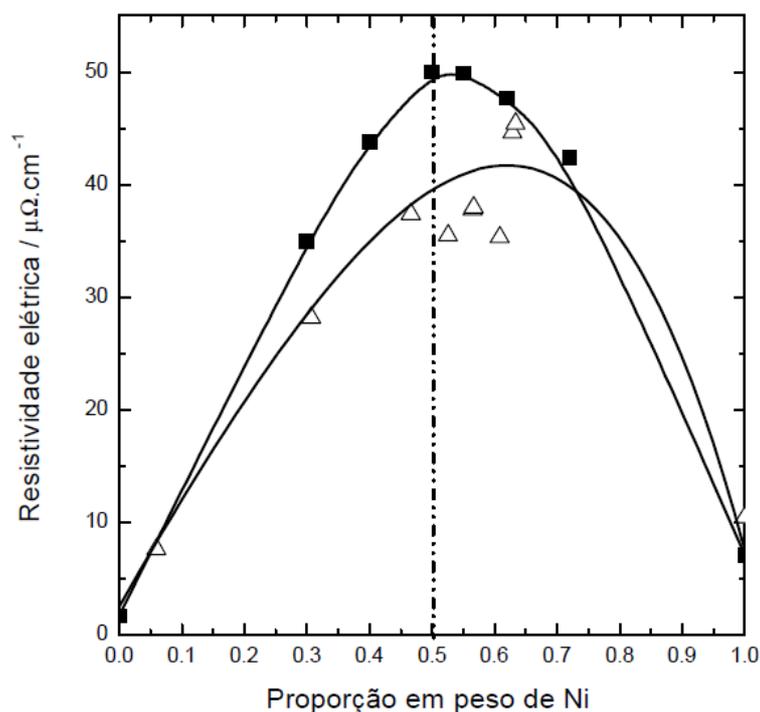


Figura 2: Resistividade elétrica de filmes finos de CuNi eletrodepositados em Si em função da proporção relativa de Ni na liga (pontos vazios). Os pontos cheios foram obtidos para a mesma liga na forma de fio [16].

Filmes metálicos ultrafinos apresentam alta absorção de radiação na região de microondas quando a espessura é da ordem de 10 nm [6-10]. Resultados ainda não divulgados por proteção tecnológica indicam que esta absorbância é diretamente proporcional à densidade de defeitos [17]. Resultados de filmes ultrafinos que podem ser de Al, Ti, NiTi, AlFe, entre outros, indicam uma absorção que pode chegar a 90%. Estudar a relação entre a espessura de filmes metálicos, a resistividade, a absorção de radiação e o controle da densidade de defeitos é fundamental para o entendimento deste mecanismo físico, e o controle destas propriedades está relacionado com aplicações tecnológicas de extrema relevância estratégica.

## Justificativa

A realização desta pesquisa se justifica frente a aprovação de fomento submetida ao edital Universal da FAPESC de 2012, segundo termo de outorga

número 2012000061, para caracterizar propriedades elétricas de filmes finos metálicos com aplicações em materiais absorvedores de radiação eletromagnética. A vigência do projeto é entre janeiro de 2013 e dezembro de 2014.

O professor coordenador tem sua experiência acadêmica bastante focada na preparação de diversos materiais na forma de filme fino por eletrodeposição e na caracterização de suas propriedades, direcionando para aplicações tecnológicas e em nanotecnologia. Especificamente, o tema do trabalho de mestrado foi a caracterização de propriedades elétricas e termoelétricas de filmes finos de constantan ( $\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{45}$ ), que é um material de elevado poder termoelétrico comumente empregado em termopares tipo T [18]. Este trabalho estava envolvido na preparação de sensores de fluxo de calor, planares e miniaturizados. Durante o doutorado, trabalhou com o semicondutor  $\text{Cu}_2\text{O}$  e na preparação de estruturas na forma de transistor de base metálica por eletrodeposição, Si-p/Co/ $\text{Cu}_2\text{O}$ , com propriedades magnéticas, diretamente relacionado com nanotecnologia, spintrônica, e o entendimento de propriedades de magnetotransporte [19, 20]. Durante o estágio de Pós Doutorado trabalhou com estruturas envolvidas em aplicações de nanotecnologia, spintrônica, e sensores magnéticos, como filmes de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), tanto em uma forma porosa quanto compacta [21], e medidas de magnetotransporte em filmes granulares de permaloy (CoFe) [22, 23]. Este período de mais de 10 anos confirma a experiência acadêmica do proponente no tema de caracterização de propriedades de transporte elétrico, térmico e mediado por fenômenos magnéticos (magnetotransporte) em materiais nanométricos e na forma de filme fino. Durante o período de mestrado desenvolveu um arranjo experimental para medidas de resistividade em filmes de constantan, utilizando a técnica de 4 pontas em linha, similar ao pretendido com esta proposta. Desta forma, esta proposta visa dar continuidade às atividades de pesquisa do proponente, e além de disseminar os conhecimentos adquiridos, aplicá-los para a construção de conhecimento no interior do Campus Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

A professora Viviane Lillian Soethe, vinculada ao Campus Joinville e colaboradora neste projeto, tem vasta experiência na preparação de materiais na forma de filme fino por Magnetron Sputtering, trabalhando com esta técnica na preparação e caracterização de materiais absorvedores de radiação eletromagnética [17]. Os resultados destes trabalhos estão sob proteção tecnológica. Neste momento, desenvolve trabalhos na preparação de filmes ultrafinos de Al, Ti, NiTi, AlFe, entre outros, por Magnetron Sputtering, em colaboração com o Centro Técnico Aeroespacial (CTA) do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) e a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Desta maneira, esta proposta vai dar possibilidade de continuidade e aprofundamento nos trabalhos com este tipo de material de elevada relevância

tecnológica, aproveitando os conhecimentos adquiridos, os contatos realizados e a infraestrutura de preparação disponível.

Através desta proposta se pretende fomentar a cooperação entre professores com interesses e experiência similares no Campus Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina. O Campus Joinville da UFSC é um Centro com especialidade em Engenharias de Mobilidade, direcionado nas áreas de Engenharia Veicular (Automobilística, Aeroespacial, Naval, Ferroviária, Mecatrônica) e de Infraestrutura (Infraestrutura de Transporte, Logística). Iniciou as atividades de graduação em 2009, e ainda está em implementação. Com esta proposta, se pretende incentivar e iniciar atividades de pesquisa, que futuramente orientarão a formação de cursos de pós graduação. Neste sentido, se pretende trabalhar na construção de conhecimento envolvendo linha de pesquisa em aplicações da Nanotecnologia nas áreas veiculares da mobilidade, com temas centralizados na grande área de Ciência e Engenharia de Materiais.

## **Metodologia**

- 1) Projeto da estrutura para fixação das pontas de prova em linha, e controle da posição
- 2) Confecção da estrutura de fixação das pontas de prova.
- 3) Anexação dos contatos elétricos na estrutura e do equipamento de controle dos valores de corrente aplicada e voltagem medida, ou voltagem aplicada e corrente medida.
- 4) Verificação do arranjo através da medida de resistividade e curvas de corrente x voltagem em materiais metálicos padronizados.
- 5) Medidas em filmes metálicos preparados por Magnetron Sputtering.
- 6) Controlar a espessura dos filmes metálicos preparados por Magnetron Sputtering
- 7) Medidas de resistividade em função da espessura.
- 8) Análise dos dados, organização dos resultados, divulgação dos resultados

## **Viabilidade Técnica**

A confecção do arranjo experimental depende da aquisição de material e equipamentos custeados pelo Governo do Estado de Santa Catarina, através de proposta aprovada à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) no edital Universal de 2012.

A preparação das amostras já é estudada pela professora Soethe, e poderá ser realizada através da infraestrutura disponibilizada por sua colaborações com o CTA em São José dos Campos, UNITAU em Taubaté, e UDESC em Joinville.

A execução das atividades ficará a cargo do professor coordenador, e estudantes do curso de graduação do Campus Joinville, mediante incentivo por bolsa de Iniciação Científica como do Programa Especial de Treinamento (PET) e PIBIC.

## **Resultados esperados**

Através da execução deste projeto, os resultados esperados podem ser:

- 1) Solidificar uma cooperação entre professores pesquisadores do Centro de Engenharia da Mobilidade/Campus Joinville, com interesses e experiência similares, aplicados em linha de pesquisa em temas vinculados às áreas de atuação do Centro de Engenharia da Mobilidade como: Ciência e Engenharia de Materiais, Física da Matéria Condensada, Filmes finos, Materiais para sensores e atuadores, Nanotecnologia. Este tipo de cooperação é considerada imprescindível para a estruturação de atividades de pesquisa neste Centro, ainda em estado embrionário.
- 2) Estabelecer um arranjo experimental para caracterização elétrica de materiais na forma de filmes finos. Após a confecção deste arranjo, esta técnica estará formalmente incluída como atividade experimental de pesquisa no Campus, que poderá ser utilizada em outros projetos e colaborações.
- 3) Iniciar estudos para entender a relação existente entre espessura, densidade de defeitos e condutividade elétrica de filmes ultrafinos e a absorção de radiação na região de microondas. Esta linha de pesquisa está fortemente relacionada com áreas de atuação do Campus Joinville, como a Engenharia Aeroespacial, em uma aplicação de elevada importância estratégica.

- 4) Gerar conhecimento suficiente para divulgação em meios considerados de alto nível de inserção científica, como revistas científicas internacionais indexadas de alto fator de impacto.
- 5) Propagar conhecimento na formação de novos pesquisadores, inicialmente através de alunos de Iniciação Científica, mas com esperança de envolver futuramente estudantes de Mestrado ou Doutorado.
- 6) Participação em congressos relacionados à Física da Matéria Condensada, Ciência e Engenharia de Materiais, Engenharia Aeroespacial.

## Referências

- [1] Sleming, W. J.; An Introduction to Microwave Absorbent Materials. Technical reference from Plessey Materials.
- [2] Mikhailovsky, L. K. Radioabsorbing Currentless (spin) Media, Materials and Coatings. Proceedings of VIII International Conference on Spin Electronics Section of International Conference on Gyromagnetic Electronics and Electrodynamics. Moscou, Russia. 1999
- [3] Brugess, L. R., Berlekamp, J.; Understanding Radar Cross Section Measurements. MSN & CT Microwaves Systems News & Communications Technology. Páginas 54-61. Outubro 1998
- [4] Knott, E. F., Shaeffer, J. F., Tuley, M. T.; Radar Cross Section - Its Prediction, Measurement and Reduction, p. 297. Artech House Inc., 1985.
- [5] Mayes, E.; U. S. Patent No 6986942. 2006
- [6] Bosman, H., Lau, Y. Y., Gilgenbach, R. M.; Applied Physics Letters **82** 1353 (2003).
- [7] Bosman, H. L., Lau, Y. Y., Gigenbach, R. M.; IEEE Transactions on Plasma Science **32** 1292 (2004).
- [8] Buchar, P., Machac, J., Zehentner, J.; IEEE Transactions on Nanotechnology **6** 645 (2007).
- [9] Hansen, R. C., Pawlewics, W. T.; IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques **30** 2064 (1982).
- [10] Poo, Y., Wu, R.-X., Fan, X., Xiao, J. Q.; Review of Scientific Instruments **81** 064701 (2010).

- [11] Ishii, N., Yasaka, Y., U.S. Patent No 6823816. 2004.
- [12] Janos, W. A.; U.S. Patent No 5298903. 1994.
- [13] Madelung, O.; Introduction to Solid-State Theory. Study Edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1978.
- [14] Liu, H.-D., Zhao, Y.-P., ramanath, G., Murarka, S.P., Wang, G.-C.; Thin Solid Films **384** 151 (2001).
- [15] Giroto, E. M., Santos, I. A.; Química Nova **25** 639 (2002).
- [16] Delatorre, R. G.; Poder Termoelétrico em Ligas de Cu e Ni Eletrodepositadas em Si. Dissertação de Mestrado. UFSC, 2002.
- [17] Soethe, V. L. Filmes Finos Absorvedores de Microondas obtidos pelo Processo de Deposição Física em Fase Vapor. Tese de Doutorado. ITA, 2009.
- [18] Delatorre, R.G., Sartorelli, M. L., Schervenski, A. Q., Pasa, A. A.; Journal of Applied Physics **93** 6154 (2003).
- [19] Delatorre, R. G., Munford, M. L., Stenger, V., Pasa, A. A.; Journal of Applied Physics **99** 08H704 (2006).
- [20] Delatorre, R. G., Munford, M. L., Zandonay, R, Zoldan, V. C., Meruvia, M. S., Hummelgen, I. A., Schwarzacher, W., Pasa, A. A.; Applied Physics Letters **88** 233504 (2006).
- [21] Delatorre, R. G., da Silva, R. C., Cruz, J. S., Garcia, N., Pasa, A. A.; Journal of Solid State Electrochemistry **13** 843 (2009).
- [22] de Araujo, C. I. L., Munford, M. L., Delatorre, R. G., da Silva, R. C., Zoldan, V. C., Pasa, A. A., Garcia, N.; Applied Physics Letters **92** 222101 (2008).
- [23] Ballestar, A., de Araujo, C. I. L., Delatorre, R. G., Pasa, A. A., Garcia, N.; Journal of Superconductivity and Novel Magnetism **22** 737 (2009).