

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ – UEM

FÁBIO LUIS HEGETO

**ESPECTRO DE IMPEDÂNCIA UTILIZANDO UMA PONTE RLC
EM POLÍMEROS LUMINECENTES**

Maringá

2011

FÁBIO LUIS HEGETO

**ESPECTRO DE IMPEDÂNCIA UTILIZANDO UMA PONTE RLC
EM POLÍMEROS LUMINECENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho de conclusão de curso apresentado para obtenção do título de bacharel em Física, da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Carlos Bento

Maringá

2011

Agradecimentos

Ao término deste trabalho, deixo aqui meus sinceros agradecimentos:

- Deus por tudo.
- A minha família, pelo incentivo e segurança que me passaram durante todo esse período.
- Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Bento, por toda a paciência e estímulo em sua orientação.
- A todos os professores do Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá.
- A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Resumo	pg	I
Lista de Figuras	pg	II
1 Introdução	pg	7
2 Fundamentações teóricas	pg	9
2.1 Circuito em corrente alternada	pg	9
2.2 Espectroscopia de impedância	pg	13
2.3 Circuito equivalentes	pg	20
3 Procedimentos experimentais	pg	22
3.1 Amostra	pg	22
3.2 Procedimento de Medidas	pg	23
4 Resultados e Discussões	pg	25
5 Conclusão	pg	30
Referências bibliográficas	pg	31

Resumo

Neste trabalho de conclusão de curso se fez uma revisão sobre circuito em corrente alternada, espectroscopia de impedância e circuito equivalente. Foi feito um espectro de impedância de um poliéster parte real e imaginária em função da frequência no intervalo de 0,1KHz – 2KHz.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Símbolo que representa a fonte alternada.....	pg 9
FIGURA 2: Resistência em fonte ca.....	pg 9
FIGURA 3: Capacitor em fonte ac.....	pg 10
FIGURA 4: Indutor ligado a fonte ca.....	pg 11
FIGURA 5: Diagrama de fasores.....	pg 12
FIGURA 6: Fonte alternada no circuito RC.....	pg 14
FIGURA 7: Impedância no plano complexo.....	pg 15
FIGURA 8: Curva da permissividade parte real do modelo de Debye.....	pg 17
FIGURA 9: Curva da permissividade imaginária do modelo de Debye.....	pg 18
FIGURA 10: O semi-circulo no plano ϵ'' vs ϵ'	pg 18
FIGURA 11: Permissividade parte real e imaginário em função da frequência, e o semi-círculo no plano ϵ'' vs ϵ' com parâmetros.....	pg 19
FIGURA 12: Circuito equivalente ao modelo de Debye.....	pg 21
FIGURA 13: Especificações da amostra Terphane.....	pg 22
FIGURA 14: Amostra na guia do eletrodo.....	pg 23
FIGURA 15: Ponte RLC Meter Gw-Instek.....	pg 23
FIGURA 16: Eletrodos.....	pg 24
FIGURA 17: Montagem experimental.....	pg 24
FIGURA 18: Variação da resistência em função da frequência.....	pg 26
FIGURA 19: Retirado da ref. E.K.Lenzi[8]., R em função de log(f) com amostra Água Mili-Q.....	pg 27
FIGURA 20: Variação da reatância em função da frequência.....	pg 28
Figura 21: Retirado do ref. E.K.Lenzi [8]. X_c em função de log(f) com amostra Água Mili-Q.....	pg 29

1 INTRODUÇÃO

A espectroscopia de impedância é uma técnica de grande utilidade para os profissionais com especialização nas áreas de física, físico-químico e ciência dos materiais, que necessitam caracterizar o comportamento elétrico de materiais sólidos ou líquidos e dispositivos eletrônicos. De forma geral, a técnica consiste em colocar a amostra para análise entre dois eletrodos paralelos, aplicar uma diferença de potencial alternada e observar a resposta da amostra ao sinal elétrico.

Vários fatores intrínsecos, como a composição química, estrutura molecular ou cristalina, homogeneidade, presença e tipo de algum tipo de portador de carga, afetam o espectro obtido. Os parâmetros derivados de um espectro de frequência situam-se geralmente em duas categorias: a) aqueles pertinentes ao material em si, tais como condutividade, constante dielétrica, mobilidade de cargas, concentração de equilíbrio de cargas, taxa de geração/cominação de cargas e b) aqueles pertinentes a uma interface entre o material e o eletrodo, tais como a capacitância da região interfacial, coeficiente de difusão, injeção e acumulação de carga, por exemplo. Para auxiliar a análise ou interpretação dos resultados obtidos dispõe-se de diversos modelos. Alguns desses modelos baseiam-se em circuitos equivalentes, outros tratam os dados do ponto de vista microscópicos e outros, procuram correlacionar as propriedades e comportamentos observados com mecanismos microscópicos que ocorrem no interior da amostra ou nas suas interfaces.

Ressalte-se que as medidas de impedância elétrica é uma técnica não destrutiva e possui uma precisão adequada para o estudo de materiais e dispositivos. As medidas de espectroscopia de impedância são relativamente simples de serem efetuadas, podem ser automatizadas quanto a varredura da frequência, da amplitude da tensão, e da precisão das medidas, etc.

Os objetivos desse trabalho de conclusão de curso é proporcionar um contato com a técnica de espectroscopia de impedância, fazer um espectro do material em estudo, ou seja, o polímero Terphane com espessura de 50 μ m, e

mostrar as curvas da parte real e imaginária da impedância complexa, para futuramente trabalhar com polímeros luminescentes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Circuito em corrente alternada

Uma bobina girando com velocidade angular constante em um campo magnético da origem a uma f.e.m. alternada senoidal descrita pela Lei de Faraday-Lens. Esse dispositivo simples é um gerador de corrente alternada ou alternador.

O alternador fornece uma diferença de potencial alternada entre seus terminais, com uma frequência que pode variar de uns poucos a muitos milhões de hertz, dependendo da função para qual foi projetado, no entanto o mais comum ou o procedimento padrão é utilizar uma fonte alternada do tipo senoidal, por exemplo:

$$V = V_0 \text{sen}(\omega t), \quad (1)$$

na qual V_0 é a amplitude de voltagem ou tensão e ω é a frequência angular ($f = (\omega/2\pi)$). Por simplicidade o alternador será designado fonte ca (fonte de corrente alternada). O símbolo para fonte alternada é:



Figura 1: Símbolo que representa a fonte alternada

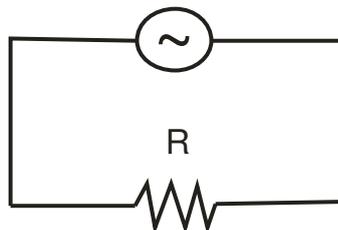


Figura 2: Resistência em fonte ca.

Ligando um resistor de resistência R entre os terminais de uma fonte ca, como indicado na Figura 2. A diferença de potencial instantânea no resistor é:

$$V_R = V_0 \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

e a corrente instantânea no resistor :

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \text{sen}(\omega t) \quad (3)$$

A amplitude de corrente ou corrente máxima é $I_0 = V_0/R$, então podemos escrever a corrente elétrica:

$$I = I_0 \text{sen}(\omega t). \quad (4)$$

Tanto a corrente como a voltagem variam com $\text{sen}(\omega t)$, de modo que a corrente está em fase com a voltagem.

Suponha que um capacitor seja ligado entre os terminais de uma fonte alternada como mostra a Figura 3, a carga instantânea no capacitor é dado por:

$$q(t) = CV = CV_0 \text{sen}(\omega t) \quad (5)$$

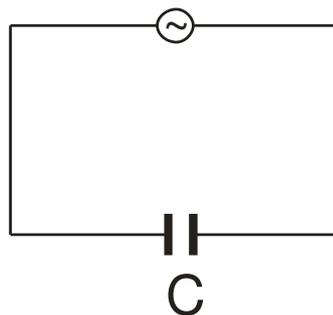


Figura 3: Capacitor em fonte ac.

A corrente elétrica é definida como a carga resultante que flui através da área por unidade de tempo. Assim a corrente elétrica por definição é dq/dt , logo a corrente instantânea no capacitor é dado pela Equação 5.

$$I(t) = \omega CV_0 \cos(\omega t) = I_0 \cos(\omega t), \quad (6)$$

I_0 é a amplitude de corrente ou a corrente máxima. Assim, se a voltagem for representada por uma função senoidal, a corrente elétrica será por uma função cossenoidal, logo a corrente não está em fase com a tensão, pois a voltagem está atrasada de 90° em relação à corrente.

A expressão para a corrente máxima pode ser escrita de forma igual a de um resistor:

$$I_0 = \omega C V_0 = \frac{V_0}{\frac{1}{\omega C}} \quad (7)$$

E definimos uma quantidade X_c , chamada de reatância capacitiva do capacitor, que no sistema internacional (SI) é dado por volts por ampere, que é ohm (Ω).

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (8)$$

Então, quando temos um circuito de corrente alternada formado por capacitores, estes também oferecem resistência à passagem de corrente elétrica. A resistência que o capacitor oferece ao circuito é a reatância capacitiva.

A diferença entre a resistência e a reatância capacitiva, é que na resistência a energia é dissipada unicamente em forma de calor enquanto que na reatância capacitiva a energia é armazenada periodicamente em campos elétricos sem que tenha perda por calor ou energia dissipada.

Agora, suponha um indutor de resistência nula e com uma auto-indutância L ligado em uma fonte ca, como apresentado na Figura 4.

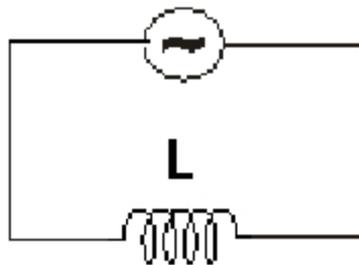


Figura 4: Indutor ligado a fonte ca.

A diferença de potencial no indutor é igual $L \frac{di}{dt}$, logo:

$$L \frac{di}{dt} = V_0 \text{sen}(\omega t) \quad (9)$$

Separando as variáveis e integrando ambos os lados temos:

$$I = -\frac{V_0}{\omega L} \cos(\omega t) \rightarrow I = I_0 \cos(\omega t) \quad (10)$$

Então se a voltagem for representada por uma função senoidal, a corrente será dada por uma curva cossenoidal negativa. A corrente não está em fase com a voltagem, a voltagem está adiantada de 90° em relação à corrente.

A reatância indutiva X_L de um indutor é definida como:

$$X_L = \omega L \quad (11)$$

Então, quando temos um circuito de corrente alternada formado com indutores, estes também oferecem resistência à passagem de corrente elétrica. A resistência que o indutor oferece ao circuito é a reatância indutiva.

A diferença entre a resistência e a reatância indutiva, é que na resistência a energia é dissipada unicamente em forma de calor enquanto que na reatância indutiva, a energia é armazenada periodicamente em campos magnéticos sem que tenha perda por calor ou energia dissipada.

Um circuito em série que tenha um resistor R, um capacitor C e um indutor L ligados a uma fonte ca, pode ser analisado pelo método denominado de vetores girantes (fasores), Figura 5.

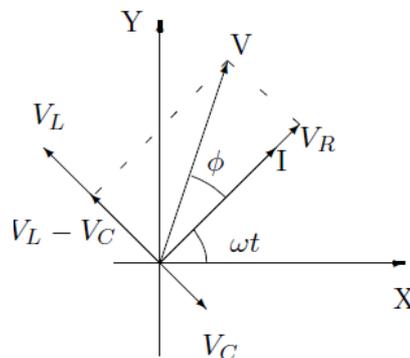


Figura 5: Diagrama de fasores.

Onde os fasores giram no sentido anti-horário com velocidade angular ω . V_R é a diferença de potencial no resistor ($V_R=RI$) e esta em fase com a corrente I, V_C é a diferença de potencial no capacitor ($V_C=X_C I$) que está atrasada 90° em relação a corrente I, e V_L é a diferença de potencial no indutor ($V_L=X_L I$) que está adiantada em relação a corrente I.

A ação conjunta da resistência e as reatâncias é definida como uma grandeza física chamado de impedância, representada pela letra Z , cuja a unidade no sistema internacional também é ohm (Ω) [2].

A impedância é uma dificuldade que a corrente sente ao atravessar o circuito elétrico, respeita as mesmas leis para associação de resistores, então para um circuito de dois elementos em série e em paralelo as impedâncias totais são dadas respectivamente, por:

$$Z = Z_1 + Z_2 \qquad \frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} . \qquad (12)$$

2.2 Espectroscopia de Impedância

A espectroscopia de impedância consiste em colocar a amostra a ser analisada entre dois eletrodos e aplicar uma diferença de potencial elétrica alternada senoidal. Logo todas as grandezas que vamos considerar oscilam com a mesma frequência angular ω , tornado vantajoso o uso da notação complexa, sendo a dependência temporal na forma $e^{j\omega t}$ onde $j = \sqrt{-1}$, muitas vezes é denotada pela letra "i". Usualmente para essa técnica é utilizada a letra "j" para não confundir com a corrente. A principal vantagem de usar a notação complexa, é que para derivar qualquer grandeza complexa em relação ao tempo, basta multiplicar por $j\omega$ [3].

$$\frac{d}{dt} \leftrightarrow j\omega \qquad (13)$$

Então podemos aplicar uma tensão alternada na forma complexa como:

$$V^* = V_o e^{j\omega t} \qquad (14)$$

A amostra, por sua vez responde com uma corrente alternada da forma complexa:

$$I^* = I_o e^{(j\omega t + \phi)}, \qquad (15)$$

onde ϕ é a diferença de fase entre a tensão elétrica e a corrente elétrica.

Considere que temos um circuito RC em série alimentado por uma fonte alternada como ilustrado na Figura 3. Aplicando a regra de Kirchhoff para as malhas

temos que a voltagem da fonte alternada é igual a soma algébrica das voltagens nos elementos do circuito.

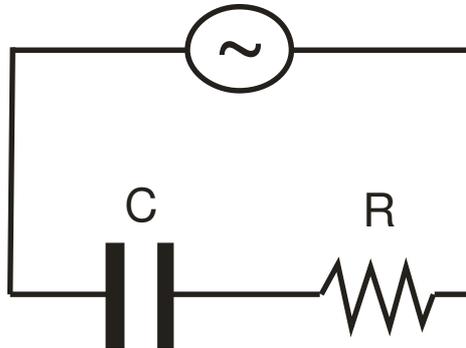


Figura 6 – Fonte alternada no circuito RC.

Então a equação Lei da Malhas:

$$V^* = \frac{Q^*}{C} + RI^* \quad (16)$$

Portanto a variação em relação ao tempo é dada por:

$$\frac{dV^*}{dt} = \frac{I^*}{C} + R \frac{dI^*}{dt} \rightarrow j\omega V^* = j\omega \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) I^*, \quad (17)$$

dividindo a equação 17 por $j\omega I^*$ temos:

$$\frac{V^*}{I^*} = R - \frac{j}{\omega C} \equiv Z^*, \quad (18)$$

onde Z^* é a impedância complexa, a parte real da impedância é o resistor e a parte imaginária da impedância é a reatância X_c .

A impedância também pode ser escrita como:

$$Z^* = Z' + jZ'' \rightarrow Z^* = |Z^*|e^{j\phi} \quad (19)$$

Onde Z' é a parte real da impedância, Z'' a parte imaginária da impedância e ϕ o ângulo de fase dado por:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right) \quad (20)$$

A Figura 7 ilustra a impedância no plano complexo:

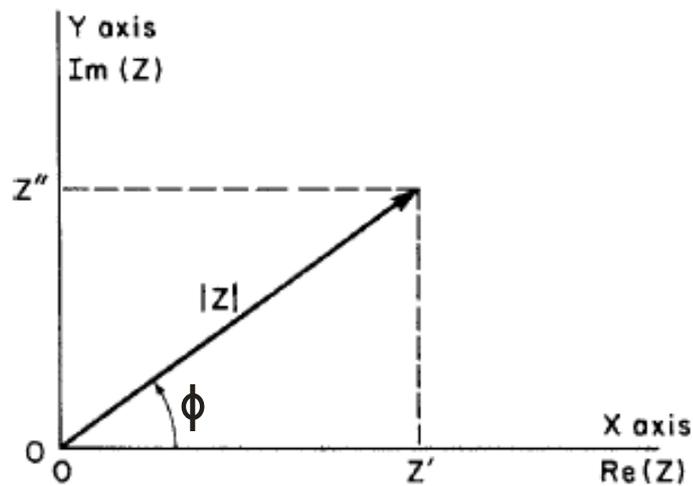


Figura 7 – Impedância no plano complexo.

Na espectroscopia se faz uma varredura da frequência e medimos a parte real e a parte imaginária da impedância complexa em função da frequência. Os gráficos da parte real e parte imaginária da impedância em função da frequência compõem o espectro de impedância para a amostra do material entre os dois eletrodos do capacitor [4].

Para o estudo das propriedades elétricas da amostra, os resultados geralmente são apresentados através da permissividade elétrica complexa. A permissividade elétrica é obtida a partir da capacitância na forma complexa $C^* = C' + jC''$.

A corrente elétrica complexa no capacitor pode ser dada pela corrente de deslocamento:

$$I^* = C^* \frac{dV^*}{dt} \quad (21)$$

Pode se escrever a parte real e a imaginária da capacitância complexa, em função das partes real e imaginária da impedância e da frequência angular, utilizando as equações 14, 15, 19 e 20 [5].

$$C' = \frac{1}{\omega} \left(\frac{-Z''}{(Z')^2 + (Z'')^2} \right) \quad e \quad C'' = \frac{1}{\omega} \left(\frac{Z'}{(Z')^2 + (Z'')^2} \right) \quad (22)$$

Com essas relações podemos calcular os valores da permissividade complexa, parte real e parte imaginária, separadamente, Para um capacitor de placas paralelas de área A e separação entre os eletrodos, d, temos:

$$\epsilon' = \frac{d}{A} C' \quad e \quad \epsilon'' = \frac{d}{A} C'' \quad (23)$$

No estudo de dielétricos se utiliza as curvas de permissividade elétrica real e imaginária em função da frequência para análise comparativa com circuitos equivalentes. A energia dissipada na amostra em cada ciclo da tensão elétrica é determinada por:

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (24)$$

Existem outras quantidades de medidas ou derivadas relacionadas com a impedância que muitas vezes desempenham papéis importantes. Todas elas podem ser genericamente chamadas de admitâncias. As principais inter-relações entre as funções da admitâncias são resumidas na Tabela 1 [6].

Tabela 1: Grandezas complexas em medidas de impedância e suas relações.

	M^*	Z^*	Y^*	ϵ^*
M^*	M^*	μZ^*	μY^{*-1}	ϵ^{*-1}
Z^*	$\mu^{-1} M^*$	Z^*	Y^{*-1}	$\mu^{-1} \epsilon^{*-1}$
Y^*	μM^{*-1}	Z^{*-1}	Y^*	$\mu \epsilon^*$
ϵ^*	M^{*-1}	$\mu^{-1} Z^{*-1}$	$\mu^{-1} Y^*$	ϵ^*

$$\mu \equiv j\omega C$$

Na literatura existem vários modelos e equações empíricas para estudar a relaxação dielétrica do material. O modelo de Debye (1929) é o mais simples e descreve o material com um único tempo de relaxação dipolar.

A permissividade dielétrica obtida pelo modelo de Debye, é apresentada na Equação 24.

$$\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon'' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad (25)$$

onde, τ é o tempo de relaxação do dipolo, ϵ_s é a permissividade dielétrica estática ($\omega \rightarrow 0$) e ϵ_∞ é a permissividade ($\omega \rightarrow \infty$). As equações parte real e imaginária da permissividade elétrica em função da frequência angular e do tempo de relaxação dos dipolos podem ser escritas nas formas:

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \quad e \quad \epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} (\omega\tau). \quad (26)$$

A curva da parte real da permissividade elétrica em função da frequência do modelo de Debye decresce do valor estático ϵ_s até o valor para altas frequências ϵ_∞ como ilustra a Figura 8 [5].

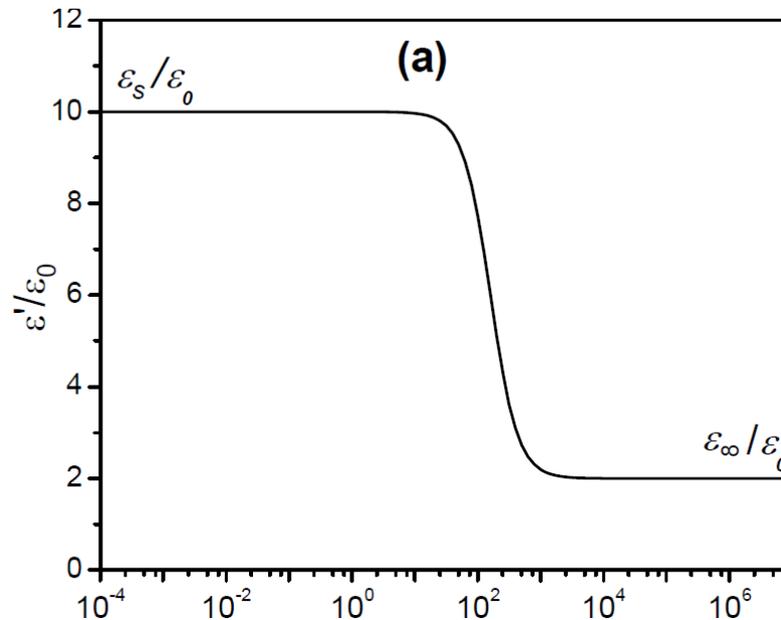


Figura 8: Curva da permissividade parte real do modelo de Debye.

A curva da parte imaginária da permissividade elétrica em função da frequência apresenta um pico de formato simétrico em relação à posição de seu máximo, denominado de relaxação dielétrica, e sua posição é determinada pela relação $\omega\tau = 1$, como está ilustrado na figura 9 [5].

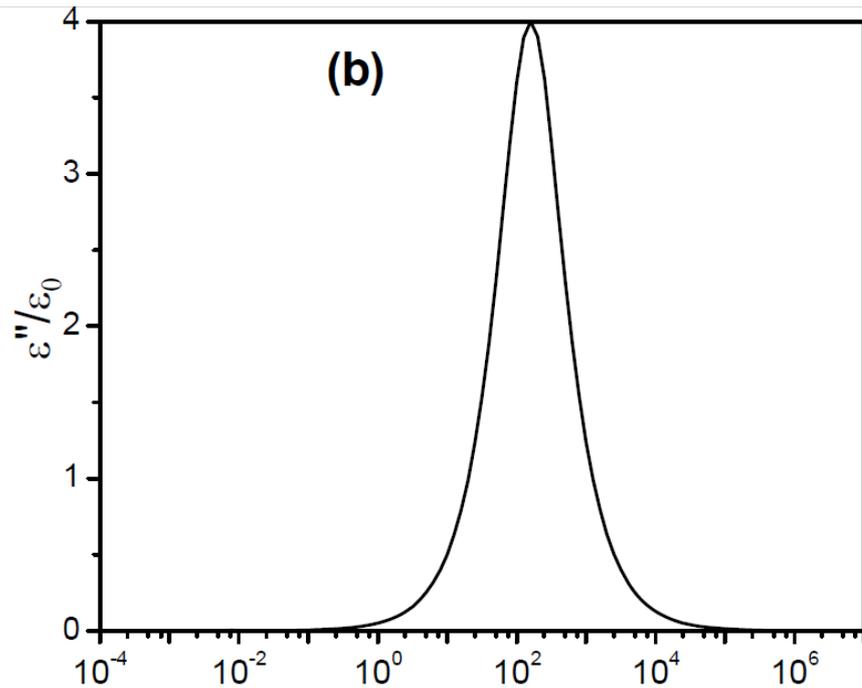


Figura 9: Curva da permissividade imaginária do modelo de Debye.

Eliminando a dependência de ω e τ da equação 26, temos a equação 27:

$$\left[\epsilon' - \left(\frac{\epsilon_s + \epsilon_\infty}{2} \right) \right]^2 + (\epsilon'')^2 = \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2} \right)^2 \quad (27)$$

que corresponde a equação de um semi-círculo como raio $R^2 = \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{2} \right)^2$, como ilustra a Figura 10 [5].

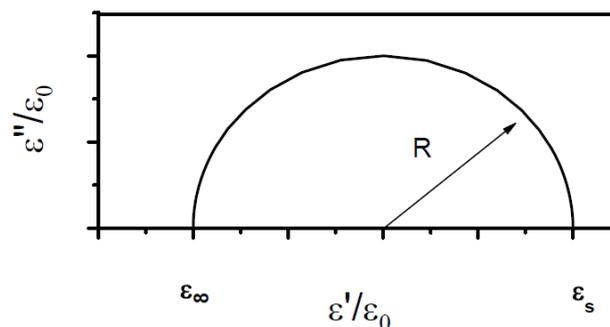


Figura 10: O semi-círculo no plano ϵ'' vs ϵ' .

Embora a teoria de Debye seja aceita na interpretação da dispersão e absorção dielétrica, os resultados experimentais muitas vezes não concordam com o seu modelo, normalmente a divergência é a consideração de apenas um tempo de relaxação.

Por isso alguns modelos como o de Cole-Cole, que modifica o modelo de Debye, introduzindo um expoente $(1 - \alpha)$ no termo $j\omega\tau$, com o objetivo de interpretar os resultados experimentais que não podiam ser descritos pelo modelo proposto por Debye [7].

Outro modelo muito utilizado para as interpretações experimentais é o modelo Cole-Davidson no qual foi proposto outro tipo de modificação do modelo de Debye, introduzindo no termo $(1 + j\omega\tau)$ do modelo de Debye que seja elevado ao expoente β .

O modelo de Havriliak-Nagami propôs uma equação mais geral englobando os modelos de Cole-Cole e Davidson-Cole. A equação é escrita como:

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau)^{(1-\alpha)}]^\beta} \quad (28)$$

Nos casos particulares de $\alpha = 0$ e $\beta = 1$ a equação 22 se reduz ao modelo de Debye, se somente $\beta = 1$ a equação se reduz ao modelo de Cole-Cole, e por fim se somente $\alpha = 0$ a equação 25 se reduz no modelo de Cole-Davidson.

A Figura 11 mostra as curvas da permissividade em função da frequência com alguns valores para α e β , para comparação e analisar o que acontece com as curvas de Debye das figuras 8, 9 e 10 com os parâmetros [5].

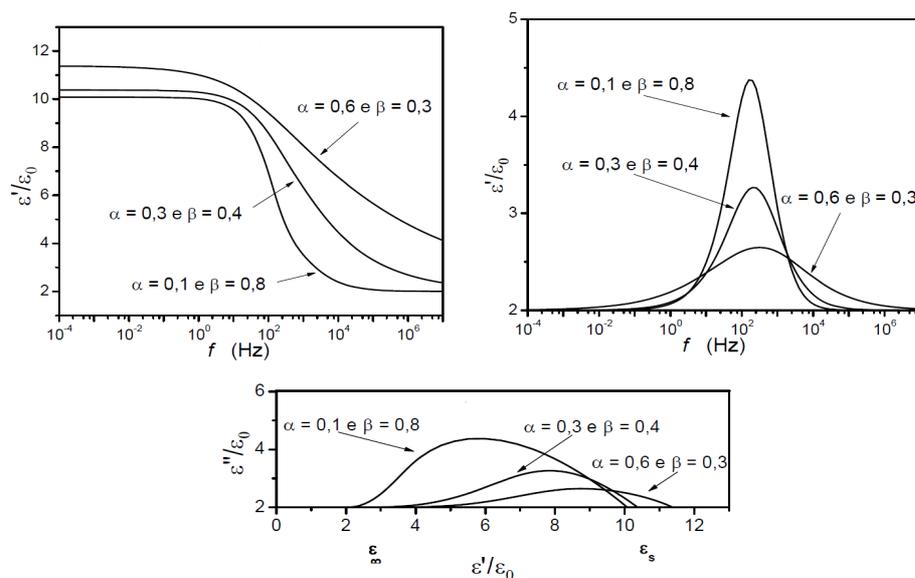


Figura 11: Permissividade parte real e imaginário em função da frequência, e o semi-círculo no plano ϵ'' vs ϵ' com parâmetros.

As equações da permissividade real e imaginária da modelo de Havrilliak-Negami [5]:

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty})}{M^{\beta}} \cos(\beta\phi) \quad e \quad \epsilon'' = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty})}{M^{\beta}} \text{sen}(\beta\phi) \quad (29)$$

onde ϕ e M é dada respectivamente, por:

$$\phi = \arctan \frac{(\omega\tau)^{(1-\alpha)} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + (\omega\tau)^{(1-\alpha)} \text{sen}(\alpha\pi/2)}$$

$$M = \sqrt{\left[(1 + (\omega\tau)^{(1-\alpha)} \cos(\alpha\pi/2))^2 + \left((\omega\tau)^{(1-\alpha)} \text{sen}(\alpha\pi/2) \right)^2 \right]} \quad (30)$$

2.3 Circuitos Equivalentes

É comum em medidas de espectroscopia de impedância análise dos resultados com um circuito elétrico equivalente. Pode se criar circuitos elétricos compostos de resistores, capacitores e indutores, que se comporta da mesma maneira que o sistema estudo.

O circuito equivalente é importante para o entendimento dos fenômenos elétricos que ocorre no sistema em estudo, por exemplo: a polarização, reações químicas, etc. Os elementos do circuito equivalente são atribuídos significado físico.

O modelo de Debye pode ser representado pelo circuito equivalente igual o da Figura 12, a equação de Debye da permissividade complexa, equação 25, pode ser escrita em função da impedância como [7]:

$$\epsilon^* = \frac{1}{j\omega \epsilon_0 Z^*} \quad (31)$$

Assim, temos:

$$\frac{1}{Z^*} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) j\omega \epsilon_0}{1 + (j\omega\tau)} \quad (32)$$

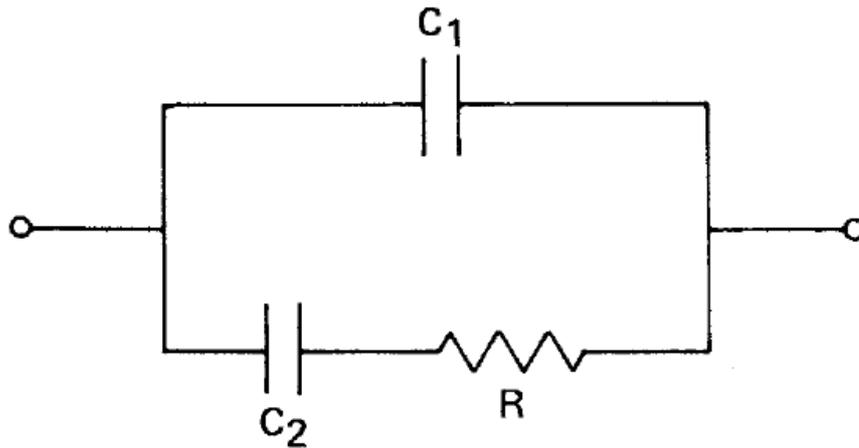


Figura 12: Circuito equivalente ao modelo de Debye.

Calculando a impedância total do circuito da Figura 12, e comparando com o a Equação 32 conseguimos comparar os componentes do circuito e ver as seguintes relações:

$$C_1 = \epsilon_0 \epsilon_\infty, \quad C_2 = (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \epsilon_0 e \tau = RC_2 \quad (33)$$

A equação 32 fica:

$$\frac{1}{Z^*} = j\omega C_{1\infty} + \frac{j\omega C_2}{1+j\omega C_2} \quad (34)$$

A grande dificuldade de usar o método de circuito equivalente para análise dos resultados experimentais, é que vários circuitos podem apresentar a mesma impedância, causando uma análise errônea dos processos físicos envolvidos. E por serem atribuídos significados físicos aos elementos eletrônicos do circuito equivalente podem causar conclusão erradas na análise, pois é muito difícil atribuir significados aos elemento eletrônicos.

3 Procedimentos Experimentais

3.1 Amostra

A amostra teste foi um poliéster transparente sem tratamento, de cinquenta micrometros de espessura, e aproximadamente com uma área de 2cm^2 , retirado de uma folha, fabricada pela indústria de Terphane.

A amostra tem como aplicação no mercado industrial, indicado para operações de revestimento de cabos e isolantes. Outras especificações da amostra estão apresentadas na Figura 13, retirada do site [<http://www.terphane.com/terphane/br.html>].

Valores Típicos

PROPRIEDADES		Métodos de Análise	Unidade	Valores Típicos	
Espessura		ASTM D 374	μm	36	50
Gramatura		ASTM D 646	g/m^2	50,4	70
Rendimento		ASTM D 646	m^2/kg	19,8	14,3
Resistência à ruptura	Longitudinal	ASTM D 882	kgf/mm^2	20	19
	Transversal			21	21
Alongamento à ruptura	Longitudinal	ASTM D 882	%	120	
	Transversal			100	
Módulo a 0,5%	Longitudinal	ASTM D 882	kgf/mm^2	420	410
	Transversal			460	420
Haze		ASTM D 1003	%	5	
Retração a $150^\circ\text{C} - 30'$	Longitudinal	Terphane GT-MA-022	%	1,5	
	Transversal			0	
Retração a $200^\circ\text{C} - 30'$	Longitudinal	Terphane GT-MA-022	%	4	
	Transversal			1,5	
Rigidez dielétrica		ASTM D 149	$\text{V}/\mu\text{m}$	120	
Constante dielétrica ($23^\circ\text{C} - 1\text{kHz}$)		ASTM D 149	-	3	

Figura 13: Especificações da amostra do Terphane.

A Figura 14 mostra a imagem da amostra nas guias dos eletrodos.

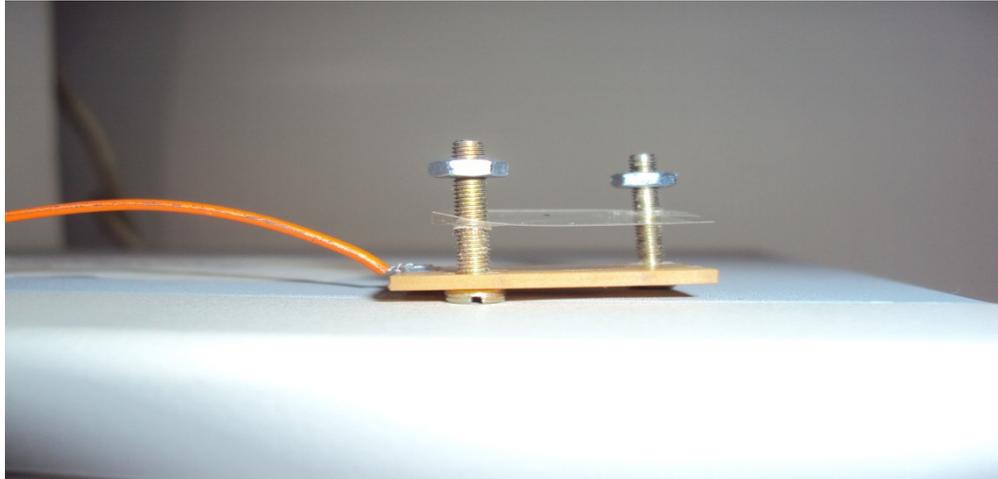


Figura 14: Amostra na guia do eletrodo.

3.2 Procedimento de Medidas

O espectro de impedância foi obtido utilizando uma ponte Gw-Instek (LCR Meter) modelo LCR-816 em faixa de operação de 0,1KHz à 2KHz, mostrado na Figura 15, todas as medidas foram feitas em temperatura ambiente



Figura 15: Ponte RLC Meter Gw-Instek.

Os eletrodos foram construídos nos laboratórios do Departamento de Física da UEM, utilizou-se uma placa de fonolite normalmente utilizada para fazer circuitos simples. A placa foi recortada em duas placas quadradas de lado de dois

de centímetro. Foi feita a corrosão do cobre na placa deixando um círculo de um centímetro de diâmetro, a Figura 16 mostra a foto dos eletrodos.

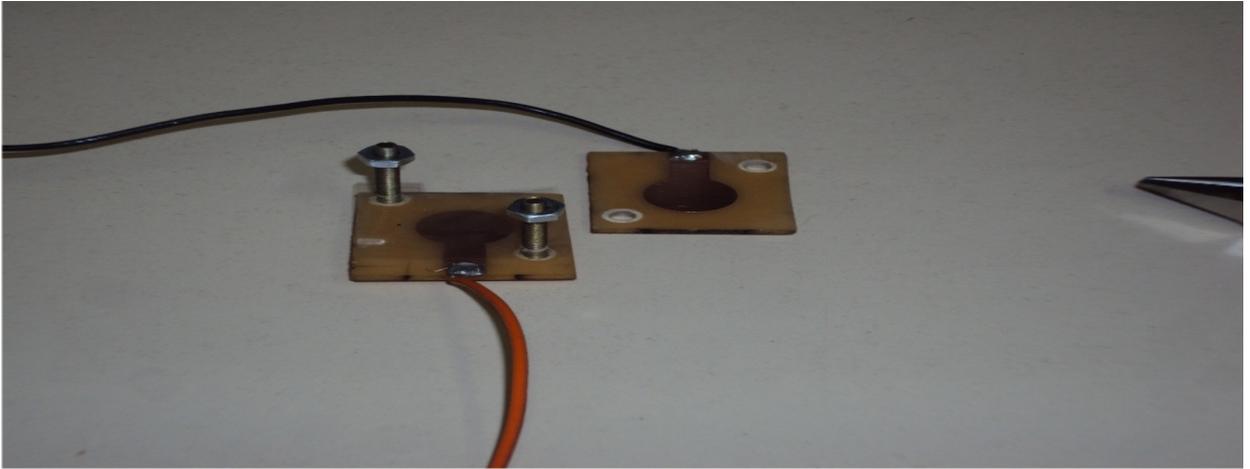


Figura 16: Eletrodos.

A placa foi perfurada e colocado dois parafusos, com duas utilidades, a primeira foi como guia e a segunda para fixar os eletrodos.

Na Figura 17, mostra a foto do equipamento montado, apesar do equipamento ter os cabos para conectar a um computador, ele não foi a conectado, pois o representante não enviou e nem recomendou um software que realiza as medidas automaticamente, assim, a varredura foi efetuada manualmente. O equipamento foi configurado para aplicar uma amplitude de voltagem de 1V, no modo em série o qual apresentou melhor resultado para esse material.



Figura 17: Montagem experimental.

4 *Resultados e Discussões*

Na tabela 2 estão apresentados os resultados das medidas efetuadas no laboratório, com a ponte Gw-Instek (LCR Meter) modelo LCR-816 com erro de 0,1% segundo o fabricante.

Tabela 2 - Medidas

frequência(kHz)	capacitância (nF)	resistência(KΩ)
0,1	0,03081	23464
0,15	0,03009	998,6
0,2	0,0297	889
0,25	0,02955	681,1
0,3	0,02931	623,8
0,35	0,02944	449,7
0,4	0,02933	382,3
0,45113	0,02924	335,7
0,5	0,02917	289,9
0,55046	0,02915	258,6
0,6	0,02908	227,5
0,65218	0,02907	201,9
0,69768	0,02902	189,8
0,75	0,029	169,9
0,80001	0,02897	155,1
0,85451	0,02898	142,1
0,89553	0,02893	126,5
0,95239	0,0289	120,1
1	0,02891	106,8
1,0526	0,02886	105,4
1,0909	0,02883	92,95
1,1539	0,02882	89,41
1,2	0,02882	86,53
1,25	0,02882	82,34
1,3044	0,0288	78,92
1,3636	0,02879	72,37
1,3954	0,02877	69,34
1,4634	0,02876	65,57
1,5	0,02877	63,16
1,5385	0,02874	59,41
1,579	0,02874	57,14
1,6667	0,02872	52,86
1,7143	0,02878	45,96
1,7647	0,0287	49,4
1,8182	0,02869	46,5
1,875	0,02868	45,38
1,9355	0,02869	40,4
2	0,02867	40,86

A primeira medida corresponde a menor frequência do aparelho de 0,1KHz, variou-se a frequência manualmente. A frequência era digitada no equipamento para efetuar variação de 50Hz em 50Hz, e o equipamento

automaticamente apresentava a frequência para o valor próximo ao qual foi digitado e fizemos a medida até o máximo do aparelho de 2KHz.

Na segunda coluna são mostrados da capacitância nF, foi percebida variação da capacitância de $3,08 \times 10^{-11} \text{F}$ em 0,1KHz até a na frequência máxima, o equipamento mostrou na tela o valor de $2,867 \times 10^{-11} \text{F}$ no limite de frequência máximo da ponte RLC.

Também são lidos na tela da ponte os valores da resistência em função da frequência, na resistência houve uma variação muito maior que a variação da capacitância, foi aproximadamente $2,3 \text{M}\Omega$ para a frequência mínima, e variou aproximadamente até $41 \text{K}\Omega$.

Com os dados medidos e apresentados na Tabela 2, calculamos a frequência angular ($\omega = 2\pi f$), e a reatância capacitiva ($X_c = 1/\omega C$). Lembrando que a impedância complexa pode ser escrita da forma $Z^* = R - jX_c$.

A Figura 18 mostra a variação da resistência ou a parte real da impedância medida em função da frequência entre o intervalo de 0,1KHz até 2KHz, para a amostra Terphane de espessura de $50 \mu\text{m}$.

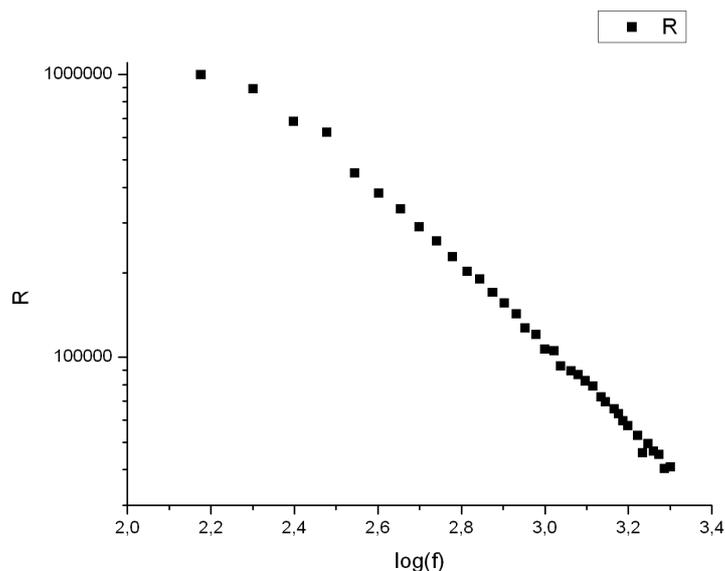


Figura 18: Variação da resistência em função da frequência.

O gráfico apresentado na figura 18 mostra a resistência em escala logarítmica em função do logaritmo da frequência, observamos a evolução de R em função da frequência uma tendência de queda de R com o aumento da frequência.

A Figura 19 é um gráfico da parte real de espectroscopia de impedância, resistência em função da frequência, e o gráfico está de acordo com o modelo de Debye, apresentado na seção 2.2 do capítulo 2. Retirado da referência [1].

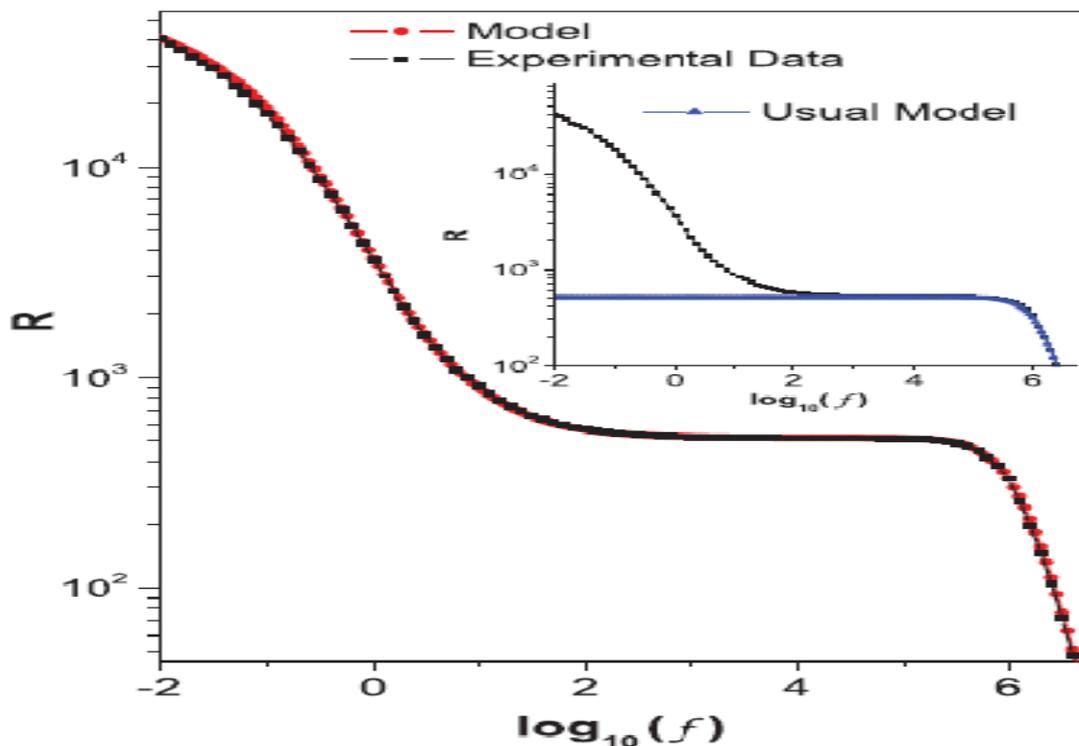


Figura 19: Retirado do ref. E.K.Lenzi [8]., R em função de $\log(f)$ com amostra Água Milli-Q.

O gráfico apresentado da Figura 19 mostra a resistência em função da frequência, mas as medidas foram feitas de uma variação de frequência de 10^{-2} Hz até 5 MHz, medidos em uma ponte Solartron 1254.

Comparando o nosso gráfico (Figura 18) com o modelo de Debye (equação 31), e com o gráfico apresentado na Figura 19, podemos ver que para os intervalos de frequência utilizados as medidas, a faixa utilizada permite uma visualização mais clara da curva típica da parte real da espectroscopia de impedância, como se vê na Figura 19. A Figura 18 se limita a uma faixa de estreita entre 2 e 4 para o $\log(f)$, sendo que só percebemos o decaimento típico de R,

igualmente visto na figura 19 para intervalo de -1 a 0 para o $\log(f)$, sendo assim se fazermos uma medida para o Terphane em um intervalo maior conseguiríamos observar a curva similar a Figura 19.

A Figura 20 mostra o gráfico da reatância capacitiva ou a parte imaginária da impedância em função da frequência do amostra Terphane.

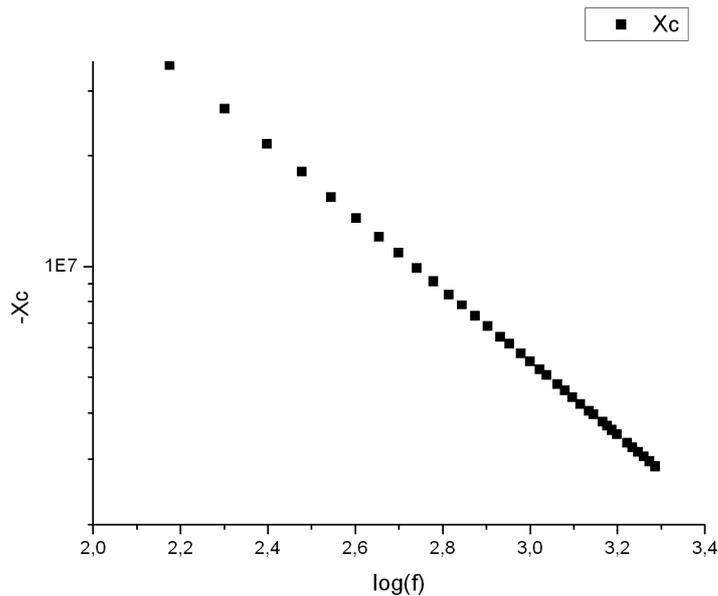


Figura 20 – Variação da reatância em função da frequência.

O gráfico apresentado na figura 20 mostra a reatância capacitiva em escala logarítmica em função do logaritmo da frequência, observamos a evolução de X_c em função da frequência, tem decaimento de X_c quase linear com o aumento da frequência normalizada.

A figura 21 é a parte imaginária do espectro de impedância, reatância em função da frequência, onde apresenta o pico de relaxação dielétrica. Retirado da mesma referência anterior [8].

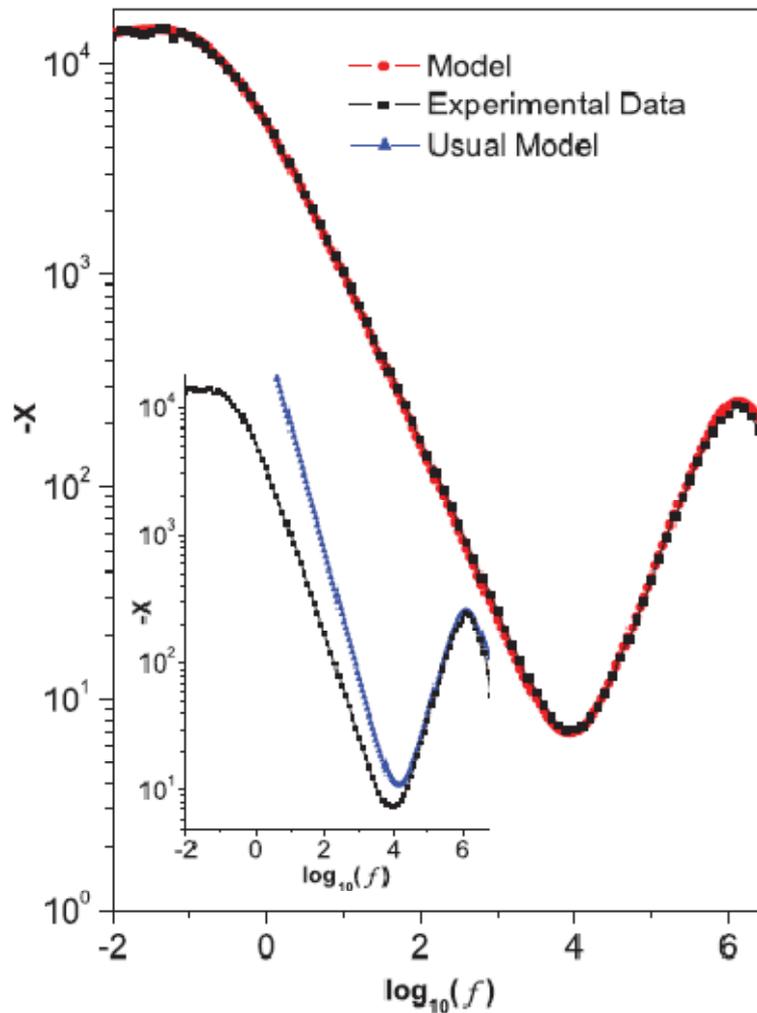


Figura 21 – Retirado do ref. E.K.Lenzi [8]., X_c em função de $\log(f)$ com amostra Água Mili-Q.

Para o gráfico do apresentado na figura 20, não conseguimos ver o “pico” de relação no intervalo de frequência medido entre 2 e 4 para o $\log(f)$. A figura 20 quando comparada a figura 21 mostra um decaimento similar, porém com intervalo limitado a uma faixa estreita do gráfico esperado, o que dificulta o seu uso para medida de relaxação, como foi aplicado por E.K.Lenzi [8]. Está é outra particular limitação da ponte usada, limitada em uma frequência máxima de 2KHz.

5 *Conclusões*

O objetivo do trabalho era o conhecimento da técnica de espectroscopia de impedância, e o material como amostra foi o Terphane de espessura de 50 μ m. O equipamento utilizado, (ponte Gw-Instek (LCR Meter) modelo LCR-816), faz medidas em uma faixa de frequência estreita onde não deu para observar as curvas típicas da parte real do espectro e impedância da amostra, e também neste intervalo a parte imaginária do espectro não foi possível chega a um resultado que mostrasse o pico de relaxação do Terphane, que permitiria estudar detalhes da relaxação da polarização do material.

Outra motivação de se aprender a usar a técnica de espectroscopia de impedância, seria para o estudo de polímeros luminescentes, como por exemplo, polímero PC/PMMA dopado com elementos do grupos dos lantanídeos como, praseodímio (Pr), neodímio (Nd), samário (Sm), e európio (Eu) e outros. Neste caso, para o estudo do espectro de impedância e sua relação a efeitos de manipulação sobre propriedades dielétricas e efeito de emissão, além de aprofundar estudos desses efeitos por medidas da constante dielétrica em função da temperatura, usando pro exemplo o aquecimento via elemento Peltier.

Seria ideal conseguir medir nos polímeros luminescente as propriedades de picos de relaxação dielétricas dado pela parte imaginária do espectro de impedância. Mas para isso é preciso aumentar a faixa de frequência, a ponte utilizada para o Terphane tem um intervalo de frequência de 100Hz-2KHZ, e o necessário seria uma ponte com um intervalo de frequência mais largo de mHz-MHz.

Referências bibliográficas

- [1] P. Debye. Polar Molecules. Lancaster Press, 1929
- [2] Sears W., Zemanky M.W. Eletricidade, Magnetismo e tópicos de física moderna, Rio de Janeiro; editora universidade de Brasília 1974, volume 3.
- [3] Nussenzveig H. M, Física básica eletromagnetismo; São Paulo, editora Blucher, 1997, 1ª edição volume 3.
- [4] D.L. Chinaglia¹, G. Gozzi, R.A.M. Alfaro e R. Hessel, Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino, Revista Brasileira de Ensino de Física, v.30, n.4, 4504, 2008
- [5] Teruya M.Y. Espectroscopia de impedância em soluções iônicas e mistura de etanol/água. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.
- [6] Barsoukov E. and Macdonald J.R. Impedance spectroscopy: Theory experiment, and applications. John Wiley & Sons, 2nd edition, 2005.
- [7] Silveira L.G.D. Aplicações de espectroscopia de impedância no estudo de blendas de biodiesel/diesel, 2010, Dissertação de mestrado; Universidade Estadual de Maringá, Maringá 2010.
- [8] E.K.Lenzi, P.R.G Fernandes, T.Petrucci, H. Mukai, and H.E.Ribeiro, Physical Review E 84, 041128(2011).