



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº PI 1103911-6

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: PI 1103911-6

(22) Data do Depósito: 23/08/2011

(43) Data da Publicação Nacional: 06/08/2013

(51) Classificação Internacional: G01R 31/36.

(54) Título: MÉTODO DE ANÁLISE DE BATERIAS RECARREGÁVEIS

(73) Titular: FUNDACAO UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL - UCS. Endereço: Rua Francisco Getúlio Vargas,1130, Cidade Universitária, Caxias Do Sul, RS, BRASIL(BR)

(72) Inventor: STANISLAV TAIROV; LUIZ CARLOS STENAVATTO FILHO.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 23/08/2011, observadas as condições legais

Expedida em: 04/05/2021

Assinado digitalmente por:

Liane Elizabeth Caldeira Lage

Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados



Relatório Descritivo de Patente de Invenção

MÉTODO DE ANÁLISE DE BATERIAS RECARREGÁVEIS

Campo da Invenção

[0001] A presente invenção descreve um aparato e método de avaliação do estado de saúde (SOH) de baterias recarregáveis baseado na medição da capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito através da análise da resposta a um sinal de múltipla frequência, podendo ser realizada sem a necessidade de a bateria ser desconectada do circuito ou descarregada. A presente invenção se situa no campo da Engenharia Elétrica e de Materiais.

Antecedentes da Invenção

[0002] Em aplicações industriais, a estimativa da capacidade residual de baterias secundárias é muito importante devido à perda de material ativo, corrosão, pouca manutenção, etc. O objeto da presente invenção consiste em avaliar o estado de saúde da bateria (SOH) ou a mudança em seu estado-da-carga (SOC) durante a vida útil da bateria. Atualmente, em sistemas de potência estacionários, a técnica mais comum é realizar testes de descarga completa. Entretanto, esses testes consomem tempo, são caros e também requerem que as células das baterias sejam desconectadas do circuito operacional. Além disso, em muitas aplicações, como no suprimento de sistemas de potência ininterruptos (UPS), onde as baterias reserva são usadas em caso de perda de energia comercial de corrente alternada, esses testes também não são possíveis.

[0003] Medidas de impedância de baterias internas têm sido propostas como técnica para avaliação do SOC ou SOH da bateria. Essa técnica proporciona uma alternativa atrativa, não-destrutível, para testes de descarga.

[0004] Pesquisas em laboratórios sobre parâmetros de impedância relacionados a SOC ou SOH de células de bateria tem sido realizadas por muitos anos. Técnicas de laboratório comumente utilizam métodos

eletroquímicos, usando sofisticados instrumentos galvanostáticos para medir a impedância eletroquímica em uma ampla faixa de frequências. No campo da eletroquímica, a impedância eletroquímica é definida como a função de transferência entre o potencial e a corrente, a qual é uma quantidade complexa e comumente medida por meio de um analisador de resposta de frequência. Em engenharia elétrica, muito comumente, impedância denota um parâmetro elétrico, algumas vezes chamado de resistência interna, cujo significado depende da técnica de medida utilizada.

[0005] Particularmente interessante é aferir o SOH de baterias comumente usadas hoje, chamadas de baterias de chumbo-ácido reguladas por válvulas (VRLA). Estas baterias “livres de manutenção”, as quais têm demonstrado uma rápida expansão em muitas áreas de utilização de baterias, urgentemente requer a técnica para avaliação da saúde da mesma. Técnicas tradicionais usadas para células não-seladas, como medidas de gravidade específica, inspeção visual de corrosão da rede e problemas internos, checagem do nível dos eletrólitos, não podem ser aplicadas, uma vez que essas células estão seladas. O único procedimento viável para detectar capacidade de falhas prematuras atualmente disponível é o teste de descarga em uma corrente contínua para uma tensão terminal especificada, o qual é caro, consome tempo e deixa a bateria a ser testada fora de serviço para um extenso período de tempo.

[0006] Formas alternativas de estimar a performance de uma bateria tem emergido nos últimos anos. Esses métodos, conhecidos como testes de bateria “*on-line*”, “*in-service*”, ou “passivos” são baseados na medida da resposta elétrica de uma célula em uma bateria a um sinal de teste aplicado, e determinam o estado de carga da célula a partir de sua resposta. Testes passivos são rápidos e menos caros que testes de carga, uma vez que a bateria não precisa ser desconectada do equipamento no qual ela está operando para o teste.

[0007] Em testadores de impedância/condutância comercialmente

disponíveis para experimentos de campo, um sinal de excitação de frequência única é usado. Vários trabalhos indicam que as técnicas de frequência única atualmente disponíveis, de “determinação ôhmica interna”, em geral, proporcionam informação inequivocamente absoluta da informação da capacidade da bateria. Dr Robinson R.S. concluiu que a variação das características das células através da gama de baterias comercialmente disponíveis (com diferentes capacidades e de diferentes fabricantes, diferentes gravidades específicas, diferentes configurações de placas ou de projeto interno) torna impossível estimar-se consistentemente os parâmetros da célula, e, portanto a sensibilidade a um dado modo de falha de bateria, com um instrumento de teste empregando uma frequência de teste fixa. Além disso, a variação nas características da célula dentre células do mesmo tipo, independente de seu desempenho, similarmente afeta a precisão das medições consistentemente feitas nos mesmos tipos de células. Isto explica a incerteza nos resultados determinados pelos testadores de frequência única.

[0008] Uma maneira de se aumentar a confiabilidade de medições passivas em baterias é fazer a medição em uma ampla faixa de frequências (diversas ordens de magnitude), e decompor tanto o componente resistivo e o reativo da resposta de célula. Estas medições são amplamente utilizadas em pesquisas laboratoriais com instrumentos eletroquímicos de precisão. Porém, devido ao desenvolvimento da microeletrônica, atualmente os métodos laboratoriais de medições de impedância de baterias multi-frequência e algoritmos de processamento de dados podem ser implementados em condições de campo.

[0009] Esta invenção é voltada para análise em multi-frequência de impedância interna de um tipo de bateria de chumbo-ácido regulada por válvula (VRLA) para o aferimento confiável da saúde de uma bateria.

[0010] No âmbito patentário, alguns documentos descrevem métodos para triagem de desempenho de baterias e carga de baterias.

[0011] O documento WO 2003/093849 descreve um método de análise

de sistemas eletroquímicos através de cálculos feitos utilizando-se o valor da impedância complexa dos referidos sistemas, que compreendem, mas não se limitam a baterias eletroquímicas. Descreve também um aparato digital para medições e processamento dos dados.

[0012] O documento WO/2001/095454 descreve um analisador e carregador de baterias, compreendendo o aparato analisador em si, um adaptador para a bateria, e um programa de análise embarcado no referido aparato. Utiliza a leitura constante da temperatura da bateria para o controle da corrente.

[0013] O documento WO 2004/023580 descreve um analisador de baterias que utiliza dados como a tensão de circuito aberto, a temperatura, e um parâmetro dinâmico, como condutância ou resistência, para medição.

[0014] O documento WO 2003/076960 descreve um analisador de baterias com comunicação de rede, capaz de enviar dados de uma bateria a uma localização remota.

[0015] O documento WO 2004/042840 descreve um analisador de baterias eletrônico com classificação das baterias baseada em respostas a perguntas que dependem dos dados medidos na bateria.

[0016] O documento WO 2003/076960 descreve um analisador de baterias com medição por método Kelvin, configurado com software para gerar dados de saída relativos à bateria em função da análise de dados dinâmicos de entrada medidos na referida bateria.

[0017] O documento US2010/0244846 revela um método de avaliação do SOH de baterias caseado na medição da impedância interna da bateria pelo método de corrente contínua, isto é, medem $R = (E-V)/I$, além de diferentes manipulações dos coeficientes.

[0018] A presente invenção difere dos documentos acima por se tratar de um método e dispositivo para a medição da capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito através da análise da resposta a um sinal de múltipla frequência para estimar o estado de saúde de uma bateria.

[0019] Do que se depreende da literatura pesquisada, não foram encontrados documentos antecipando ou sugerindo os ensinamentos da presente invenção, de forma que a solução aqui proposta possui novidade e atividade inventiva frente ao estado da técnica.

Sumário da Invenção

[0020] A presente invenção descreve um aparato e método de avaliação do estado de saúde (SOH) de baterias recarregáveis baseado na medição da capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito através da análise da resposta a um sinal de múltipla frequência, podendo ser realizada sem a necessidade de a bateria ser desconectada do circuito ou descarregada. Esta invenção apresenta a vantagem em relação a dispositivos comerciais de não requerer a desconexão da bateria de um circuito, o que é particularmente útil em sistemas de UPS, e outros sistemas em que a bateria não deve ser desconectada do circuito em momento algum.

[0021] É, portanto, um dos objetos da presente invenção um método de análise de estado de saúde de células de baterias recarregáveis compreendendo as seguintes etapas:

- a) excitar a(s) bateria(s) a ser(em) analisada(s) com um sinal de múltiplas frequências;
- b) medir a resposta da(s) bateria(s) ao sinal, rejeitando a tensão de polarização da(s) bateria(s);
- c) obter um espectro de impedância com base na resposta obtida em b); e
- d) estimar o estado de carga da(s) referida(s) bateria(s) com base nos valores de capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito obtidos.

[0022] Em uma realização preferencial, as baterias analisadas são do tipo chumbo-ácido regulada por válvula (VRLA).

[0023] Em uma realização preferencial, o sinal aplicado na referida bateria é um sinal com forma de soma de senos (SOS).

[0024] Em uma realização preferencial, o *software* do sistema para o

controle, aquisição de dados e processamento de dados é executado em um ambiente que possua uma interface gráfica, preferencialmente o ambiente do programa LabView 8.2.

[0025] Em uma realização preferencial, a geração do sinal de teste e pós processamento dos dados foi desenvolvido no MatLab.

[0026] É um objeto adicional da presente invenção um aparato para análise de estado de baterias recarregáveis compreendendo:

- a) circuito *driver* de corrente;
- b) amplificador diferencial;
- c) meios para gerar sinais de múltipla frequência;
- d) meios para medir a resposta de pelo menos uma bateria a sinais de múltipla frequência; e
- e) meios para processar dados obtidos e estimar o estado de saúde da(s) bateria(s) analisada(s) com base no valor da capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito.

[0027] Estes e outros objetos da invenção serão imediatamente valorizados pelos versados na arte e pelas empresas com interesses no segmento, e serão descritos em detalhes suficientes para sua reprodução na descrição a seguir.

Breve Descrição das Figuras

[0028] A Figura 1 revela um diagrama de blocos do sistema de medição, onde: (11) soma de senos; (12) sistema de dados; (13) bateria analisada; (14) filtragem não-linear; e (15) diagramas de transformada de Fourier (Nyquist, Bode).

[0029] A Figura 2 revela uma progressão do parâmetro de Randles ao longo da vida útil ou descarga de uma bateria, onde: (21) resistência CC (Ohms); (22) capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito (Farads); (23) nível de bateria completamente carregada; e (24) vida útil ou perda de capacidade (tempo).

[0030] A Figura 3 exibe o espectro de impedância (diagramas de Nyquist) obtidos para diferentes DODs (profundidades de descarga).

[0031] A Figura 4 revela gráficos de Bode da fase do espectro de impedância para diferentes DODs.

Descrição Detalhada da Invenção

[0032] Os exemplos aqui mostrados têm o intuito somente de exemplificar algumas das inúmeras maneiras de se realizar a invenção, contudo sem limitar, o escopo da mesma.

Método de Análise de Estado de Saúde de Baterias

[0033] O método de análise de estado de saúde de células de baterias recarregáveis da presente invenção compreende as seguintes etapas:

- a) excitar a(s) bateria(s) a ser(em) analisada(s) com um sinal de múltiplas freqüências;
- b) medir a resposta da(s) bateria(s) ao sinal, rejeitando a tensão de polarização da(s) bateria(s);
- c) obter um espectro de impedância com base na resposta obtida em b); e
- d) estimar o estado de carga da(s) referida(s) bateria(s) com base nos valores de capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito obtidos.

Baterias

[0034] De acordo com a presente invenção, qualquer tipo de bateria eletroquímica é adequado para ser analisado através do método e/ou aparato descritos. Em uma realização preferencial, as baterias analisadas são do tipo chumbo-ácido regulada por válvula (VRLA).

Sinal de Teste

[0035] Segundo a presente invenção, os sinais de teste aplicados à carga compreendem múltiplas freqüências. Em uma realização preferencial, o sinal aplicado na referida bateria é um sinal com forma de soma de senos (SOS).

Meios para Processamento, Controle e Aquisição de Dados

[0036] São adequados na presente invenção quaisquer meios para processamento, aquisição e controle de dados envolvidos. Em uma realização preferencial, são utilizados softwares.

[0037] Em uma realização preferencial, o *software* do sistema para o controle, aquisição de dados e processamento de dados é executado com em um ambiente que possua uma interface gráfica, preferencialmente o ambiente do programa LabView 8.2.

[0038] Em uma realização preferencial, a geração do sinal de teste e pós processamento dos dados foi desenvolvido no MatLab.

Aparato Analisador de Estado de Saúde de Baterias Recarregáveis

[0039] É um objeto adicional da presente invenção um aparato para análise de estado de baterias recarregáveis compreendendo:

- a) circuito *driver* de corrente;
- b) amplificador diferencial;
- c) meios para gerar sinais de múltipla frequência;
- d) meios para medir a resposta de pelo menos uma bateria a sinais de múltipla frequência; e
- e) meios para processar dados obtidos e estimar o estado de saúde da(s) bateria(s) analisada(s) com base no valor da capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito.

Exemplo 1. Realização Preferencial

Materiais e Métodos

[0040] O diagrama de blocos do sistema experimental é exibido na Figura 1. O circuito *driver* de corrente recebe o sinal de teste Soma dos Senos (SOS) gerado pelo software e converte o sinal de tensão D/A para um sinal de corrente, o qual é utilizado para excitar a bateria. Um amplificador diferencial rejeita a tensão de polarização e detecta a resposta da bateria ao sinal de teste. Adicionalmente, a corrente de teste também é detectada simultaneamente. Estes registros de tempo capturados são processados pelo

algoritmo de processamento de dados para obter o espectro de impedância.

[0041] O sistema protótipo consiste em um computador *host* (*notebook*) com um cartão DAQ 6062A da National Instruments interfaceado a um circuito personalizado alimentado por uma fonte de alimentação dupla analógica. Este circuito incluiu um amplificador analógico, um conversor tensão-para-corrente, um amplificador diferencial e um sensor para se medir a temperatura ambiente. o protótipo é atualmente configurado para testar sistemas de bateria VRLA (baterias chumbo ácidas reguladas por válvula) 12 V com capacidade para 100Ah.

[0042] O software do sistema para o controle, aquisição de dados e processamento de dados é executado com LabView 8.2, o qual possui uma interface gráfica. A geração do sinal de teste e pós processamento dos dados foi desenvolvido no MatLab.

Testes de Baterias VRLA

[0043] Os elementos do circuito Randles representam processos reais e/ou modos de falha na bateria ao longo de sua vida útil. A progressão de parâmetros Randles ao longo da vida da bateria foi estudada em “Scott N. ‘*Comprehensive, low-cost testing of standby batteries*’, in DATAWEEK Electronics & Communications Technology. 15 de outubro de 2008”. As mesmas características são também demonstradas durante uma descarga, ou perda de capacidade. Pode ser visto que a resistência não é o fator principal durante os primeiros estágios da falha ou perda de capacidade. A impedância, por si só, portanto, não fornece indicações significativas até que a perda de capacidade é maior que entre 25 e 30%.

[0044] Uma vez que o padrão da indústria é a substituição de baterias que estão abaixo de 80% do desempenho especificado, fica claro que a possível falha deve ser indicada muito antes do que conseguimos no presente. Diferente da resistência, a capacitância de dupla camada se diferencia significativamente nos primeiros estágios de modos de falha, exceto *RS* de corrosão puramente metálica. Existe uma relação mais direta e quantificável

entre o indicador principal do estado de saúde, C_{dl} , e os ampères-hora da bateria, e entre a capacitância de baterias “saudáveis” e “pobres” do mesmo tipo, do que entre valores únicos de resistência e condição da bateria.

[0045] Portanto, é importante avaliar as alterações dos parâmetros do circuito de Randles para pequenos valores da profundidade de descarga (DOD = 1 – SOC).

[0046] Neste exemplo, medimos parâmetros Randles por pequenas alterações no SOC, as quais correspondem com os primeiros estágios de vida útil da bateria. A bateria utilizada no teste é uma bateria selada de chumbo ácido, MI100HE, produzida pela corporação Moura. A tensão nominal da bateria é 12V e a capacidade nominal é 100Ah. Todas as medições foram feitas em temperatura $22^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{ C}$.

[0047] Os diagramas de Nyquist da bateria estudada na faixa de frequência de 1 a 700 Hz são exibidos na Figura 3. Para menores quantidades de DOD (até 6%), as curvas de impedância diferem levemente entre uma e outra. Todas as curvas são achatadas significativamente comparando-se com o modelo teórico de Randles da primeira ordem. Estes fatores tornam difícil se determinar a frequência característica $f_c = 1/2\pi R_{ct} C_{dl}$ em medições práticas. A Figura 4 exhibe diagramas de Bode das fases dos mesmos testes de bateria. Estes gráficos revelarem os pontos mínimos locais na faixa de frequência que corresponde com o modelo Randles de primeira ordem. De acordo com o modelo ideal, estes pontos de fase mínima correspondem à frequência mínima:

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi R_{ct} C_{dl}} \sqrt{\frac{R_{ct} + R_S}{R_S}}$$

[0048] Na Figura 3, esta frequência mínima está no ponto da linha tangente da origem da curva de Nyquist. Esta frequência está localizada na área do modelo teórico de Randles de primeira ordem e mais apropriadamente reflete os valores dos parâmetros do modelo.

[0049] Os valores da frequência mínima f_{min} na Figura 4 foram obtidos por interpolação quadrática de três pontos mínimos de diagramas de fase e

processamento de dados estatístico.

[0050] Uma vez que os componentes resistivos de parâmetros da bateria são alterados levemente no estágio inicial da vida útil da bateria, pode-se concluir que o fator de influência principal na frequência mínima f_{min} no período inicial da vida útil da bateria é C_{dl} .

[0051] Portanto, a medição de f_{min} na faixa de frequência correspondente ao primeiro semicírculo do diagrama de Nyquist da bateria diretamente caracteriza a alteração de SOC no período inicial da vida útil da bateria, ou seja, seu SOH.

[0052] Esta abordagem pode ser estendida para outros tipos de sistemas de potência eletroquímicos que podem ser descritos pelo modelo Randles, tais como baterias de lítio.

[0053] Os versados na arte valorizarão os conhecimentos aqui apresentados e poderão reproduzir a invenção nas modalidades apresentadas e em outras variantes, abrangidos no escopo das reivindicações anexas.

Reivindicações

1. Método de análise de estado de saúde de células de baterias recarregáveis compreendendo as etapas de:

a) excitar a(s) bateria(s) a ser(em) analisada(s) com um sinal de múltiplas frequências, através da conversão de um sinal de tensão D/A para um sinal de corrente por meio de um circuito controlador de corrente;

b) medir a resposta da(s) bateria(s) ao sinal, rejeitando a tensão de polarização da(s) bateria(s) por meio de um amplificador diferencial;

c) obter um espectro de impedância com base na resposta obtida em b) através de um algoritmo de processamento de dados;

caracterizado por:

d) estimar o estado de carga da(s) referida(s) bateria(s) com base nos valores de capacitância de dupla camada entre eletrodos e eletrólito obtidos, por meio de:

- medição de alterações do estado de carga da(s) bateria(s) através de medição de parâmetros de Randles;

- geração de diagramas de Nyquist da(s) bateria(s);

- comparação do modelo teórico de Randles de primeira ordem com os diagramas de Nyquist gerados; e

- medição da frequência mínima na faixa de frequência correspondente ao primeiro semicírculo do diagrama de Nyquist, em que a dita frequência mínima corresponde a alteração do estado de carga da(s) bateria(s).

2. Método de análise, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelas baterias analisadas serem do tipo chumbo-ácido regulada por válvula (VRLA).

3. Método de análise, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo sinal aplicado na referida bateria compreender um sinal com forma de soma de senos (SOS).

FIGURAS

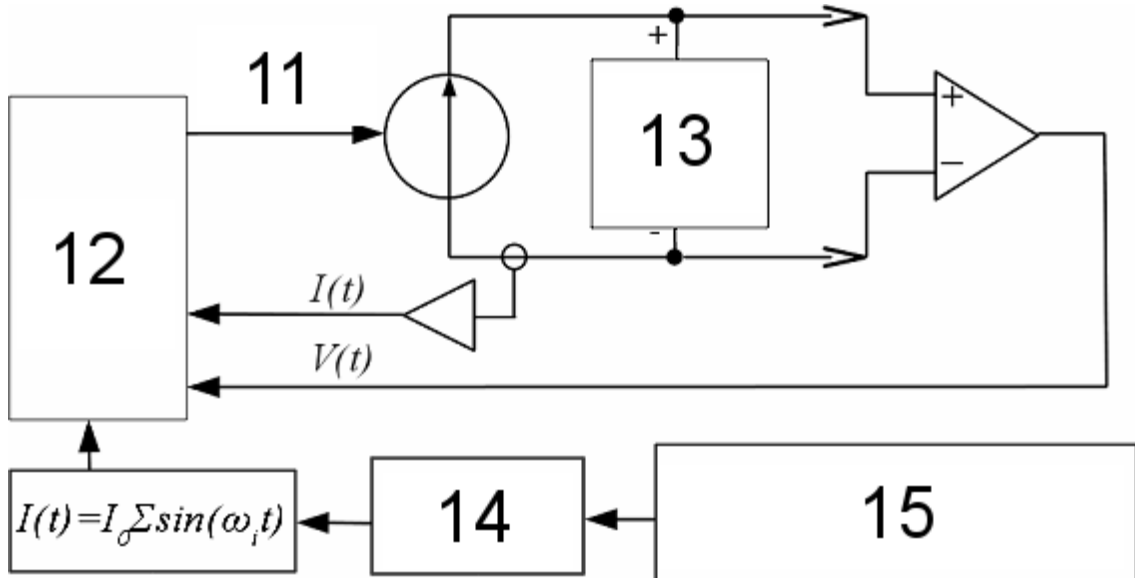


Figura 1

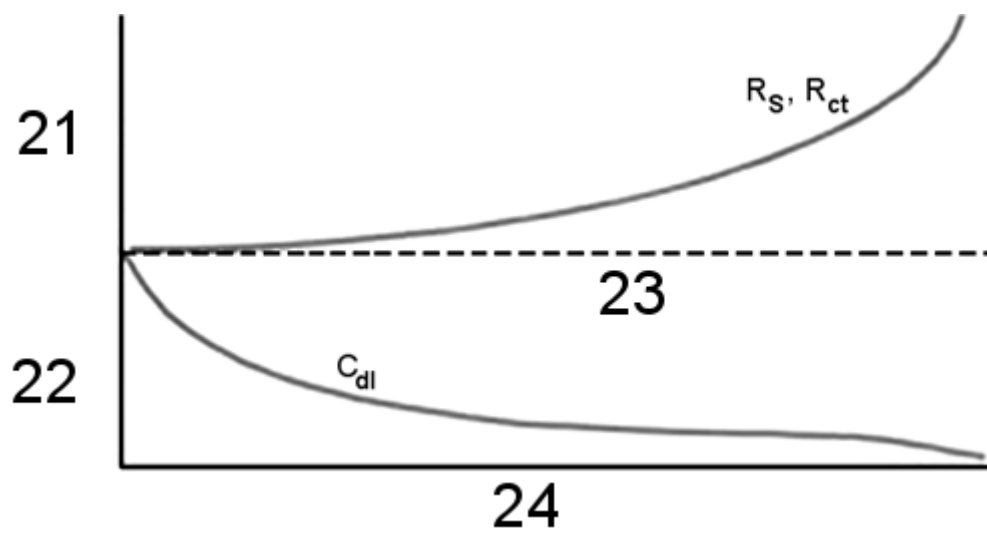


Figura 2

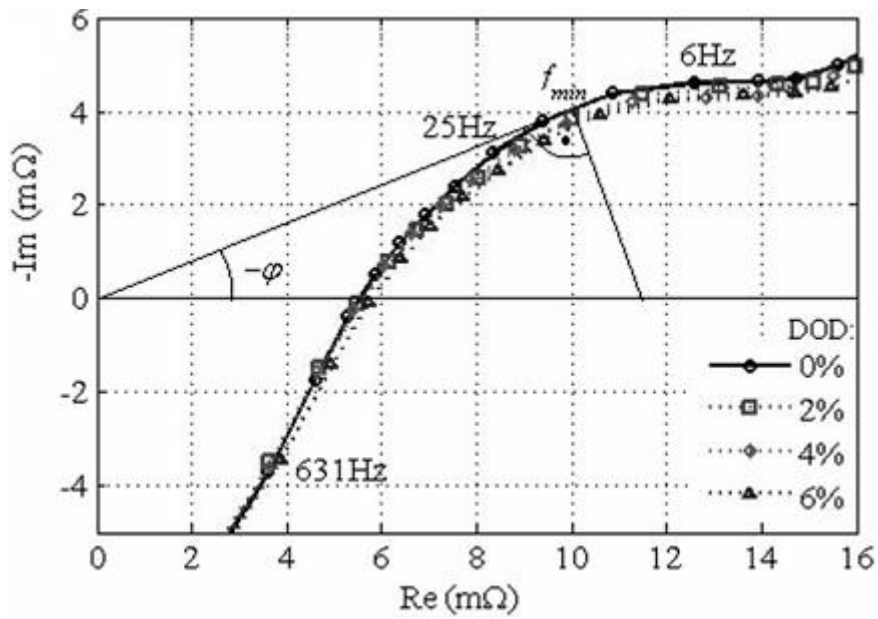


Figura 3

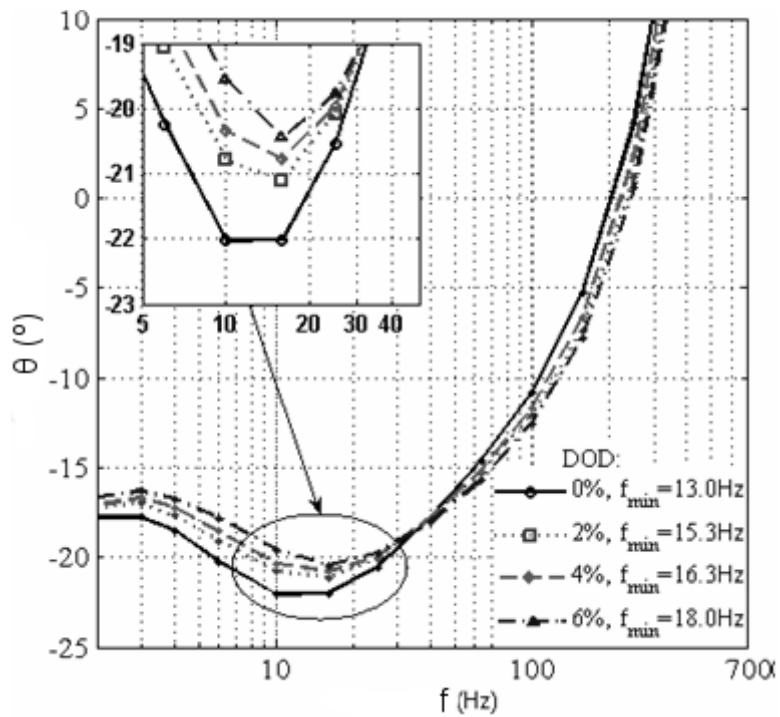


Figura 4