



República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,  
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102021020940-2 A2

(22) Data do Depósito: 19/10/2021

(43) Data da Publicação Nacional:  
09/05/2023

**(54) Título:** SISTEMA E DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE ESPECTRO DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA PORTÁTEIS

**(51) Int. Cl.:** G01R 27/02.

**(52) CPC:** G01R 27/02.

**(71) Depositante(es):** UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP.

**(72) Inventor(es):** LORENZO ANTONIO BUSAGLIA; JOÃO PAULO PEREIRA DO CARMO;  
OSVALDO NOVAIS DE OLIVEIRA JUNIOR.

**(57) Resumo:** SISTEMA E DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE ESPECTRO DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA PORTÁTEIS. A presente invenção apresenta um sistema e um dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica portáteis e customizáveis, voltados para uso nos laboratórios de educação superior, nos laboratórios de pesquisa e em campo (*in loco*). Ambos o sistema e dispositivo compreendem um circuito de geração de frequência (2.a); um circuito de amplificação da saída (2.b); um circuito de amplificação da resposta (2.c); um circuito de cálculo da transformada discreta de Fourier (DFT) (2.d); um circuito de calibração da impedância (2.e) e um circuito de comunicação serial (2.f). Desse modo, o sistema e dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica da presente invenção apresentam versatilidade de aplicação da espectroscopia de impedância elétrica para diversos materiais em que inclui novas estratégias para amplificação do sinal da saída, amplificação do sinal da resposta, cálculo da transformada discreta de Fourier (DFT), filtragem de interferências e calibração da impedância.

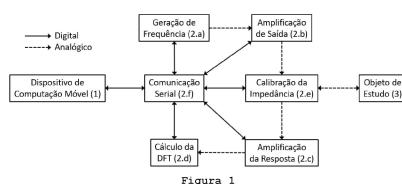


Figura 1

**SISTEMA E DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE ESPECTRO DE  
IMPEDÂNCIA ELÉTRICA PORTÁTEIS**

**Campo da invenção:**

[001] A presente invenção se insere no campo do ensino superior das engenharias e da física, no campo das pesquisas em física, físico-química, ciências dos materiais, biologia e medicina, mais especificamente na área da espectroscopia de impedância elétrica.

**Fundamentos da invenção:**

[002] A espectroscopia de impedância elétrica é uma técnica com três grandes áreas de utilidade. A primeira é a sua utilização nos laboratórios de educação superior em engenharias e física para o ensino da resposta em frequência de circuitos elétricos, que também servem como analogia para sistemas mecânicos, dentre outros. A segunda é a sua utilização nas pesquisas das áreas de física, físico-química e ciências dos materiais para caracterizar materiais sólidos, líquidos ou gasosos. A terceira é a sua utilização nas pesquisas das áreas de físico-química, biologia e medicina para a detecção de analitos em amostras líquidas ou gasosas, tendo aplicação em diagnóstico clínico, controle de qualidade de alimentos e monitoramento de culturas celulares.

[003] De uma maneira geral, a técnica de medida consiste em conectar os dois terminais analógicos do circuito eletrônico com a amostra, o material ou o circuito sob investigação, aplicar um estímulo elétrico e medir a resposta resultante. Vários tipos de estímulo podem ser considerados, no entanto o mais comum, ou o procedimento padrão, é utilizar uma tensão alternada do tipo senoidal, e

medir a impedância elétrica complexa. Estes passos são repetidos alterando a frequência da tensão aplicada e os gráficos da impedância elétrica complexa em função da frequência compõem o espectro de impedância elétrica para aquele dispositivo formado pela amostra, material ou circuito e as vias de conexão com o circuito eletrônico.

[004] A aquisição da resposta em frequência é importante em diversos sistemas físicos e de engenharia, como pontes suspensas ou filtros de ruído. Como a excitação mecânica destes sistemas normalmente requer dispositivos grandes e custosos, uma alternativa para propósitos educacionais está no uso de sistemas elétricos, os quais são baratos e fáceis de montar.

[005] Tradicionalmente, estes tipos de medidas utilizam espetrômetros de impedância elétrica altamente precisos e de muito amplo espectro com quase nenhuma limitação prática em relação a faixas de impedância elétrica, de frequência ou de amplitude de sinal. Entretanto, o alto custo destes dispositivos (>10k USD), juntamente aos seus grandes tamanho e peso, impedem a sua implementação no ensino superior.

[006] Durante os últimos anos, a portabilidade dos espetrômetros de impedância elétrica comerciais tem evoluído consideravelmente, resultando em dispositivos pequenos com comunicação sem fio. No entanto, seus altos custos ainda representam uma barreira.

[007] Uma alternativa explorada em alguns laboratórios de ensino foi a utilização acoplada de dispositivos geradores de sinal e osciloscópios para exemplificar a resposta em algumas frequências. No entanto, isto não

permite a aquisição automática do espectro de impedância elétrica, resultando em um trabalho lento e manual com dispositivos não portáteis.

[008] Já no âmbito das pesquisas em física, físico-química, ciências dos materiais, biologia e medicina, a principal barreira surge na utilização dos espectrômetros de impedância elétrica em sistemas integrados para análises específicas. O alto custo dos espectrômetros impede a sua integração dentro dos protótipos, além de não terem seu software nem o formato geométrico do seu circuito e invólucro customizáveis.

[009] Com a ambição de facilitar o ensino da análise de resposta em frequência e de fazer a ponte entre a crescente diversidade em sensores e biossensores e o desenvolvimento de sistemas integrados baseados em espectroscopia de impedância elétrica para serem utilizados em campo, a presente invenção foi desenvolvida.

**Estado da técnica:**

[010] O documento CN103698607 (D1) “*Impedance-spectrum measuring system based on wireless digital electrode*” revela um sistema de espectroscopia de impedância rápido e sem perdas, que é resultante de uma evolução de técnicas anteriores utilizando-se circuitos periféricos acompanhados do componente responsável pela espectroscopia de impedância.

[011] Em comparação com esta anterioridade, a presente invenção traz novidades com a inclusão de um microcontrolador e subsistemas de regulagem de *clock*, de amplitude DC, de amplitude AC, de chaveamento de calibração, de amplitude de resposta e de filtragem de

ruído. Na prática, isto permite funcionalidades além das possíveis com o desenho citado na anterioridade, como medir em frequências baixas (1Hz-1kHz), escolha arbitrária de amplitude AC (10mV-1V), controle sobre a amplitude DC, comparação automática com resultado sobre resistores de calibração (necessário para cálculo preciso de impedância), regulagem automática da amplitude de resposta (necessário para evitar problemas de achatamento e saturação na aquisição). O conjunto de todos os circuitos periféricos na presente invenção é o que faz a diferença entre um dispositivo com potencial de medir impedância (como é o citado na anterioridade) e um que efetivamente mede automaticamente e com precisão compatível com impedâncias de biosensoriamento.

[012] O documento US20190072545 (D2) "*Point-of-care apparatus and methods for detecting cancer using electrochemical impedance or capacitance spectroscopy*" revela um dispositivo portátil para detecção de biomarcadores ou analitos através de espectroscopia de impedância.

[013] Apesar de os diagramas de blocos e as aplicações serem similares, a presente invenção propõe uma eletrônica em um nível de detalhe muito superior ao descrito por esta anterioridade, não tendo nenhum componente em comum. A presente invenção utiliza da técnica de espectroscopia de impedância elétrica, e não eletroquímica como no documento D2, baseada na utilização de sensores com 2 (dois) eletrodos, diferentemente dos sensores de 3 (três) eletrodos citados nesta anterioridade. Além disso, os pontos mencionados anteriormente referentes ao documento D1

também se aplicam para o documento D2.

[014] O documento US20180348140 (D3)

*"Electrochemiluminescence method and apparatus for detecting an analyte in a liquid sample"* mostra um aparato e método para detecção de analito em amostras líquidas nas quais utilizam espectroscopia de impedância para realizar uma detecção precisa e satisfatória. O método conta com etapas, assim como a presente invenção, de calibração, filtragem, conversão, amplificação, cálculos com alto grau de precisão e exatidão.

[015] O documento D3 supracitado descreve um protocolo de medição, com passo a passo das tarefas a serem executadas, citando reações químicas com soluções iônicas, fluxo de líquidos e parâmetros a considerar, porém sem explicitar detalhes sobre a eletrônica envolvida no processo. O protocolo segue uma lógica de múltiplas medições consecutivas para comparação entre resultados e assim chegar em conclusões. Inclui a apresentação destes resultados em um display integrado. Além disso, utiliza fenômenos de eletroquimioluminescência, onde o material sendo analisado é excitado através de tensão elétrica oscilatória, produzindo fótons (luz) que são medidos.

[016] Para esta técnica cita-se a utilização de múltiplos eletrodos, diferentemente da presente invenção que utiliza a técnica de espectroscopia de impedância elétrica a partir do uso de somente 2 (dois) eletrodos e utiliza da técnica de espectroscopia de impedância elétrica, e não eletroquimioluminescência. Além dos pontos ressaltados em D1, que também se aplicam em relação a D3.

[017] O documento CN102357035 (D4) "Portable multimode

*bioelectrical impedance spectrum measurer"* revela um dispositivo para medição de espectro de impedância bioelétrica multimodo portátil. Assim, a presente invenção possui algumas características semelhantes como: portabilidade, utilização de espectroscopia de impedância, alta precisão, rápida medição, cálculos da transformada de Fourier diferenciados, filtragem, calibração e outras.

[018] Entretanto, no documento D4 supracitado a geração do sinal é feita misturando ondas de múltiplas frequências, seguido de uma aquisição de alta velocidade a partir da qual uma Transformada Rápida de Fourier é feita, calculada a partir de uma demodulação Digital Ortogonal para acelerar o processo, resultando assim em um cálculo unificado do espectro. Além de utilizar circuitos eletrônicos que utilizam princípios de tensões diferenciais e espelho de bipolaridade de corrente.

[019] A presente invenção, diferentemente do documento D4, descreve com precisão o circuito eletrônico utilizado para a execução da técnica de espectroscopia de impedância elétrica, as funcionalidades oferecidas e o cálculo do espectro são feitos medindo uma frequência de cada vez, a partir do cálculo da Transformada Discreta de Fourier (não confundir com a Rápida) de frequência única.

[020] Apesar de ambos os métodos terem como resultado um espectro de impedância elétrica, o passo a passo utilizado na presente invenção é diferente, medindo as frequências de forma sequencial e não simultânea e a técnica citada em D4 faz uso de 4 (quatro) eletrodos, dois de excitação e dois de leitura, enquanto a presente invenção foi desenhada para a utilização de um único par de

eletrodos. Além dos pontos ressaltados em D1, que também se aplicam em relação a D4.

[021] Em comparação com os dispositivos de medição de espectro de impedância elétrica mais próximos desenvolvidos, a presente invenção inclui novas estratégias para regulagem mais fina de amplitude, faixa mais larga de impedâncias, ajuste automático de amplificação, calibração e filtragem e melhoria da precisão do cálculo da transformada discreta de Fourier, dentre outras melhorias.

**Breve descrição da invenção:**

[022] A presente invenção apresenta um sistema e um dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica portáteis e customizáveis. A presente invenção é voltada para uso nos laboratórios de educação superior, nos laboratórios de pesquisa e em campo (in loco). A presente invenção apresenta versatilidade de aplicação da espectroscopia de impedância elétrica para diversos materiais em que inclui novas estratégias para amplificação do sinal da saída, amplificação do sinal da resposta, cálculo da transformada discreta de Fourier (DFT), filtragem de interferências e calibração da impedância.

**Breve descrição das figuras:**

[023] Para obter uma total e completa visualização do objeto desta invenção, são apresentadas as figuras as quais se fazem referências, conforme segue.

[024] A figura 1 mostra uma ilustração esquemática da arquitetura do sistema de medição de espectro de impedância elétrica portátil (não inclui circuito de alimentação, placa de conexão ou invólucro).

[025] A figura 2 mostra uma ilustração esquemática da

arquitetura do sistema de medição de espectro de impedância elétrica portátil para medidas com múltiplos objetos de estudo (não inclui circuito de alimentação, placa de conexão ou invólucro).

[026] A figura 3 mostra a arquitetura do dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica portátil (não inclui circuito de alimentação, placa de conexão ou invólucro).

[027] A figura 4 mostra o circuito eletrônico do dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica portátil (não inclui circuito de alimentação).

[028] A figura 5 mostra uma imagem dos circuitos eletrônicos do protótipo do dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica portátil.

[029] A figura 6 mostra uma imagem do protótipo do dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica portátil com o invólucro aberto.

[030] A figura 7 mostra uma imagem do protótipo do dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica portátil com o invólucro fechado.

#### **Descrição detalhada da invenção:**

[031] A presente invenção apresenta um sistema de medição de espectro de impedância portátil e customizável, conforme apresentado na figura 1, voltada para o uso nos laboratórios de ensino e de pesquisa e para o uso em campo (*in loco*). A presente invenção apresenta versatilidade de utilização da espectroscopia de impedância elétrica para diversas aplicações em diversos objetos de estudo (3) e compreende:

- um dispositivo de computação móvel (1);

- um circuito de geração de frequência (2.a);
- um circuito de amplificação da saída (2.b);
- um circuito de amplificação da resposta (2.c);
- um circuito de cálculo da DFT (2.d);
- um circuito de calibração da impedância (2.e);
- um circuito de comunicação serial (2.f);

[032] O dispositivo de computação móvel (1) é responsável por receber, armazenar e processar os dados das medições de espectroscopia de impedância elétrica do objeto de estudo (3). O dispositivo de computação móvel (1) contém um mecanismo de comunicação, responsável por comunicar os parâmetros da medida de espectroscopia de impedância elétrica - que são configurados por um usuário - ao circuito de comunicação serial (2.f), tais como: frequência inicial, frequência final e número de pontos, dentre outros. O dispositivo de computação móvel (1) pode também ser responsável por plotar gráficos dos resultados durante a medição.

[033] O processamento do dispositivo de computação móvel (1) classifica o objeto de estudo (3) pelo espetro de impedância elétrica medido. Esta classificação pode ser feita, por exemplo, através de equações lineares resultantes de curvas de calibração, através de algoritmos de visualização de informações (InfoViz), tais como *principal component analysis (PCA)*, *Sammon's mapping*, *interactive document mapping (IDMAP)* e *parallel coordinates*, ou através de algoritmos de aprendizado de máquina. Exemplos de dispositivos de computação móvel (1) são computadores, celulares e tablets.

[034] O circuito de geração de frequência (2.a) tem a

função de gerar, de forma programável, as frequências necessárias para a medida de espectroscopia de impedância elétrica.

[035] A medida de espectroscopia de impedância elétrica é feita gerando, uma a uma, uma série de frequências diferentes e analisando a impedância elétrica do objeto de estudo (3) para cada uma destas frequências, resultando em um espectro de impedância elétrica. Para a maioria das aplicações de biossensoriamento, estas frequências ficam entre 1 (um) Hz até 100k (cem kilo) Hz.

[036] O circuito de geração de frequência (2.a) é composto por um sintetizador digital direto (DDS) que contém um registrador de controle de frequência (FCR), um registrador de acumulação de fase (PAR), uma tabela *look-up* (LUT) senoidal e um conversor digital-analógico (DAC). No funcionamento, o PAR acumula periodicamente o valor (FCW) armazenado no FCR e o resultado é a posição em que a LUT senoidal é acessada e convertida pelo DAC. Isto resulta em um sinal com formato senoidal escalonado (*flat-top*) em que a frequência é definida pela frequência do relógio de referência (*clock*) do sistema e pelo FCW configurado.

[037] O circuito de amplificação de saída (2.b) tem a função de ajustar, de forma programável, as tensões AC e DC do sinal de saída do circuito de geração de frequência (2.a) necessárias para a medida de espectroscopia de impedância elétrica.

[038] O sinal aplicado na medida de espectroscopia e impedância elétrica tem uma amplitude de tensão elétrica alternada (AC) e uma amplitude de tensão elétrica contínua (DC) e precisa ser capaz de fornecer a corrente necessária

para aplicar estas tensões no objeto de estudo para todas as frequências da espectroscopia de impedância elétrica. Para a maioria das aplicações de biosensoriamento, as amplitudes AC ficam entre 10m (dez mili) V e 1 (um) V e as amplitudes DC normalmente ficam em 0 (zero) V, podendo variar até 1 (um) V. Para a maioria das aplicações de biosensoriamento, as impedâncias ficam entre 100 (cem) ohm e 1M (um mega) ohm.

[039] O circuito de amplificação de saída (2.b) é composto por uma amplificação programável, um resistor de *input*, um primeiro amplificador operacional (op-amp), um potenciômetro programável, um DAC e um segundo op-amp. O conjunto da amplificação programável, o resistor de *input*, o primeiro op-amp, o potenciômetro programável e o DAC são responsáveis por permitir o ajuste fino das amplitudes AC e DC. O segundo op-amp encontra-se em modo *follower* e tem a função de aumentar o limite máximo de corrente, permitindo medir impedâncias baixas até 100 (cem) ohm.

[040] O circuito de amplificação da resposta (2.c) tem a função de, após a aplicação do sinal proveniente do circuito de saída (2.b) no objeto de estudo (3), amplificar o sinal de resposta de forma automática para evitar problemas de saturação e achatamento na conversão feita pelo conversor analógico-digital (ADC) do circuito de cálculo da DFT (2.d).

[041] O sinal de saída é aplicado ao objeto de estudo (3), resultando em um sinal de resposta. A amplitude do sinal de resposta é proporcional (direta ou inversamente) a dois parâmetros: a amplitude do sinal de saída e a magnitude da impedância elétrica sendo medida. Para

exemplificação, em biossensoriamento podem ser encontradas amplitudes entre 10m (dez mili) V e 1 (um) V (2 décadas) e magnitudes de impedância elétrica entre 10 (dez) ohm e 10M (dez mega) ohm (6 décadas). Com base nesta exemplificação, percebe-se que a amplitude do sinal de resposta pode assumir valores dentro de uma faixa que envolve múltiplas ordens de magnitude.

[042] Para a posterior leitura da impedância elétrica, o sinal de resposta fica conectado com a entrada de um conversor analógico-digital (ADC). O ADC é responsável por converter, em um instante determinado, a tensão elétrica presente na sua entrada a um valor digital entre 0 (zero) e um máximo determinado pelo hardware. No entanto, para isto ocorrer corretamente, a tensão elétrica na entrada do ADC precisa estar dentro dos limites determinados pelo hardware. Quando a tensão elétrica se encontra fora destes limites, a conversão é feita de forma incorreta, caracterizando um problema de saturação. Já se a amplitude da tensão elétrica na sua entrada for pequena demais, as variações ficam imperceptíveis pelo hardware, resultando em resolução insuficiente e caracterizando um problema de achatamento. Assim, para permitir a leitura do sinal de resposta com o ADC é necessário fazer um ajuste da amplitude (amplificação) do sinal de resposta para evitar os problemas de saturação e achatamento.

[043] O circuito de amplificação da resposta (2.c) é composto por um op-amp, um multiplexador analógico (A-Mux), um conjunto de resistores de *feedback* e uma amplificação programável. A impedância do objeto de estudo (3) cumpre a função de impedância de *input* e o A-Mux permite escolher

qual dos resistores de *feedback* fica conectado ao op-amp.

[044] O circuito de cálculo da DFT (2.d) tem as funções de fazer a conversão digital-analógica do sinal processado pelo circuito de amplificação da resposta (2.c) e fazer o cálculo da DFT evitando problemas causados por *undersampling*, efeitos de borda ou componentes *flat-top*.

[045] A definição de impedância elétrica, para uma determinada frequência, é o quociente entre a tensão elétrica aplicada ao objeto de estudo (3) e a corrente elétrica resultante. Uma alternativa para fazer esta medição reside em fazer uma DFT para a frequência aplicada, que consiste em fazer uma somatória do produto entre o sinal de saída o sinal de resposta durante um período de tempo. Assim, o ADC faz um número fixo de conversões sequenciais e cada conversão é imediatamente multiplicada com a saída do DDS e acumulada com o resultado da multiplicação anterior. Estas operações são feitas em um núcleo de multiplicação e acumulação (M-Ac) e tem como resultado a DFT, que é armazenada em dois registradores.

[046] No entanto, há três questões principais que afetam a precisão da DFT. A primeira questão é que, quanto menos conversões são feitas pelo ADC dentro de cada oscilação dos sinais, pior é a precisão da DFT, caracterizando um problema de *undersampling*. A segunda é que, quanto menos oscilações forem abrangidas durante o tempo total das conversões, pior é a precisão da DFT, caracterizando um problema de efeitos de borda. Assim, baseado nestas duas questões, é essencial ter o controle da frequência de conversão do ADC, a qual é proporcional à frequência do *clock* do sistema. Já a terceira questão é que

a saída do DDS tem formato senoidal escalonado (*flat-top*) e, para se obter um formato senoidal suave, precisa ser implementado um filtro passa-baixa (LPF) com frequência de corte que permita a frequência senoidal e elimine a frequência *flat-top*, que também é proporcional à frequência do *clock*. Assim, como a frequência do *clock* precisa ser controlada para melhorar a precisão da DFT, também é essencial ter o controle da frequência de corte do LPF para eliminar a frequência *flat-top* do sinal.

[047] O circuito de cálculo da DFT (2.d) é composto por um ADC, um núcleo M-Ac, um *clock* fixo, um *clock* programável, um LPF fixo, um op-amp, um A-Mux, dois resistores auxiliares e um conjunto de capacitores de *feedback*. O conjunto do *clock* fixo e o *clock* programável definem a frequência de conversão do ADC. O conjunto do op-amp, o A-Mux, os resistores auxiliares e os capacitores de *feedback* se configuram como um LPF programável onde o A-Mux permite escolher qual capacitor de *feedback* fica conectado ao op-amp. O LPF fixo faz uma filtragem adicional para altas frequências. O conjunto do ADC e o núcleo M-Ac fazem o cálculo da DFT.

[048] O circuito de calibração da impedância (2.e) tem a função de substituir de forma automática o objeto de estudo (3) pela resistência de calibração apropriada.

[049] Para converter o resultado da DFT em um valor de impedância elétrica é necessário conhecer todas as impedâncias envolvidas no circuito. No entanto, ter este conhecimento é complicado pela presença de impedâncias parasitas no circuito, além de desvios de fabricação dos componentes.

[050] Uma alternativa para obter o valor de impedância elétrica do objeto de estudo (3) reside em calcular uma segunda DFT aplicando o mesmo sinal de saída sobre uma resistência de calibração. A DFT resultante é utilizada em uma multiplicação cruzada para a obtenção do valor da impedância elétrica. Quanto mais próxima esteja a magnitude da resistência de calibração com a magnitude da impedância elétrica do objeto de estudo (3), mais precisa será a calibração. Assim, durante a medição de espectroscopia de impedância, é necessária a substituição do objeto de estudo (3) por uma resistência de calibração de magnitude similar.

[051] O circuito de calibração da impedância (2.e) é composto por um A-Mux e um conjunto de resistores de calibração. Em uma das saídas do A-Mux encontra-se conectado o objeto de estudo (3) e nas saídas restantes do A-Mux encontram-se conectados os resistores de calibração, permitindo assim fazer a substituição de forma programável.

[052] O circuito de comunicação serial (2.f) tem a função de fazer a ponte de comunicação entre o dispositivo de computação móvel (1) e os demais circuitos eletrônicos (2.a, 2.b, 2.c, 2.d e 2.e).

[053] Atualmente, a maior parte dos circuitos integrados disponíveis no mercado para serem implementados nos circuitos de geração de frequência (2.a), de amplificação da saída (2.b), de amplificação da resposta (2.c), de cálculo da DFT (2.d) e de calibração da impedância (2.e) utiliza o protocolo de comunicação serial *Inter-Integrated Circuit* (I2C). Entretanto, a maior parte dos dispositivos de computação móvel (1) possui somente

conexões de comunicação serial do tipo *Universal Serial Bus* (USB) ou *Bluetooth* (BT), ambas não compatíveis com o tipo I2C. Tendo isto em vista, se faz necessária a presença de uma ponte de comunicação entre ambas as partes.

[054] O circuito de comunicação serial (2.f) é composto por uma memória, um processador, uma interface de comunicação I2C e uma interface de comunicação compatível com o dispositivo de computação móvel (1). Em termos de praticidade é interessante empregar um microcontrolador para este fim, já que integra memória, processamento e interfaces de comunicação. A memória armazena o algoritmo da espectroscopia de impedância elétrica, que consiste em cálculos e intercâmbios de mensagens com o dispositivo de computação móvel (1) e os demais circuitos eletrônicos do espetrômetro de impedância elétrica (2).

[055] O objeto de estudo (3) pode ser de variadas naturezas, dependendo da aplicação sendo dada à medida de espectroscopia de impedância elétrica. Por exemplo, nos laboratórios de ensino o objeto de estudo (3) pode ser um circuito eletrônico de componentes passivos, tais como resistores, capacitores e indutores, ou variáveis, tais como potenciômetros manuais ou programáveis. Continuando a exemplificação, já nas pesquisas de diagnóstico clínico, controle de qualidade de alimentos e monitoramento de culturas celulares o objeto de estudo (3) pode ser um sensor ou biosensor e uma amostra de tecido ou fluido biológico, de alimento ou de meio de cultura, respectivamente. Além dos exemplos já citados, o objeto de estudo (3) pode ser qualquer material que necessite ser caracterizado ou qualquer solução ou mistura na qual seja

necessário quantificar componentes ou analitos.

[056] O objeto de estudo (3) é conectado com os circuitos de amplificação da saída (2.a), de amplificação da resposta (2.b) e de calibração da impedância (2.e) através de 2 (dois) eletrodos. No caso da utilização simultânea de múltiplos objetos de estudo (3), o sistema de medição de espectro de impedância elétrica portátil pode também incluir um circuito de multiplexação analógica (chaveamento) entre os circuitos eletrônicos e os objetos de estudo (3), como apresentado na figura 2.

[057] Adicionalmente, a presente invenção apresenta um dispositivo de medição de espectro (espectrômetro) de impedância elétrica (2) portátil e customizável, conforme apresentado na figura 3, voltado para o uso nos laboratórios de ensino e de pesquisa e para o uso em campo (*in loco*). O dispositivo de medição de espectro apresenta versatilidade de utilização da espectroscopia de impedância elétrica para diversas aplicações.

[058] O espectrômetro de impedância elétrica (2) é o dispositivo responsável por obter os parâmetros da medida de espectroscopia de impedância elétrica, fazer a geração dos sinais analógicos para aplicação no objeto de estudo (3), fazer a aquisição dos sinais analógicos de resposta e comunicar os resultados de impedância elétrica ao dispositivo de computação móvel (1). O espectrômetro de impedância elétrica (2) compreende, conforme apresentado na figura 4:

- um circuito de geração de frequência (2.a);
- um circuito de amplificação da saída (2.b);
- um circuito de amplificação da resposta (2.c);

- um circuito de cálculo da DFT (2.d);
- um circuito de calibração da impedância (2.e);
- um circuito de comunicação serial (2.f);
- um circuito de alimentação (2.g);
- uma placa de conexão (2.h);
- um invólucro (2.i);

[059] O circuito de geração de frequência (2.a) tem a função de gerar, de forma programável, as frequências necessárias para a medida de espectroscopia de impedância elétrica. O circuito de geração de frequência (2.a) é composto por um sintetizador digital direto (DDS) que contém um registrador de controle de frequência (FCR), um registrador de fase (PAR), uma tabela *look-up* (LUT) senoidal e um conversor digital-analógico (DAC). No funcionamento, o PAR acumula periodicamente o valor (FCW) armazenado no FCR e o resultado é a posição em que a LUT senoidal é acessada e convertida pelo DAC. Isto resulta em um sinal com formato senoidal escalonado (*flat-top*) em que a frequência é definida pela frequência do relógio de referência (*clock*) do sistema e pelo FCW programado.

[060] Para fins de prototipagem e implementação foi utilizado o DDS contido no circuito integrado AD5933.

[061] O circuito de amplificação de saída (2.b) tem a função de ajustar, de forma programável, as tensões AC e DC do sinal de saída do circuito de geração de frequência (2.a) necessárias para a medida de espectroscopia de impedância elétrica. O circuito de amplificação de saída (2.b) é composto por uma amplificação programável, um resistor de *input*, um primeiro amplificador operacional (op-amp), um potenciômetro programável, um DAC e um segundo

op-amp. O conjunto da amplificação programável, o resistor de *input*, o primeiro op-amp, o potenciômetro programável e o DAC é responsável por permitir o ajuste fino das amplitudes AC e DC. O segundo op-amp encontra-se em modo *follower* e tem a função de aumentar o limite máximo de corrente, permitindo medir impedâncias baixas até 100 (cem) ohm.

[062] Para fins de prototipagem e implementação foi aplicada como amplificação programável aquela de 4 (quatro) opções do circuito integrado AD5933 aplicado no circuito de geração de frequência (2.a), como resistor de *input* um resistor de 806 ohm, como op-amps o circuito integrado AD8606 da *Analog Devices*, como potenciômetro programável o circuito integrado AD5252 da *Analog Devices* e como DAC o circuito integrado MCP4725 da *Microchip*.

[063] O circuito de amplificação da resposta (2.c) tem a função de, após a aplicação do sinal proveniente do circuito de saída (2.b) no objeto de estudo (3), amplificar o sinal de resposta de forma automática para evitar problemas de saturação e achatamento na conversão feita pelo ADC do circuito de cálculo da DFT (2.d). O circuito de amplificação da resposta (2.c) é composto por um op-amp, um multiplexador analógico (A-Mux), um conjunto de resistores de *feedback* e uma amplificação programável. A impedância do objeto de estudo (3) cumpre a função de impedância de *input* e o A-Mux permite escolher qual dos resistores de *feedback* fica conectado ao op-amp.

[064] Para fins de prototipagem e implementação foi aplicado como op-amp outro circuito integrado AD8606 da *Analog Devices*, como A-Mux o circuito integrado ADG728 da

*Analog Devices*, como resistores de *feedback* 7 resistores com magnitudes distribuídas logaritmicamente entre 100 (cem) ohm e 1M (um mega) ohm e como amplificação programável de 2 (duas) opções aquela do circuito integrado AD5933.

[065] O circuito de cálculo da DFT (2.d) tem as funções de fazer a conversão digital-analógica do sinal processado pelo circuito de amplificação da resposta (2.c) e fazer o cálculo da DFT evitando problemas causados por *undersampling*, efeitos de borda ou componentes *flat-top*. O circuito de cálculo da DFT (2.d) é composto por um ADC, um núcleo M-Ac, um *clock* fixo, um *clock* programável, um LPF fixo, um op-amp, um A-Mux, dois resistores auxiliares e um conjunto de capacitores de *feedback*. O conjunto do *clock* fixo e o *clock* programável definem a frequência de conversão do ADC. O conjunto do op-amp, o A-Mux, os resistores auxiliares e os capacitores de *feedback* se configuram como um LPF programável de primeira ordem e amplificação unitária onde o A-Mux permite escolher qual capacitor de *feedback* fica conectado ao op-amp. O LPF fixo faz uma filtragem adicional para altas frequências. O conjunto do ADC e o núcleo M-Ac fazem o cálculo da DFT.

[066] Para fins de prototipagem e implementação foi aplicado como ADC, núcleo M-Ac, *clock* fixo e LPF fixo do circuito integrado AD5933, como *clock* programável a *breakout board* da Adafruit que contém o circuito integrado Si5351 da Silicon Labs, como A-Mux um segundo circuito integrado ADG728 da Analog Devices, como resistores auxiliares 2 (dois) resistores de 3,3k (três vírgula três kilo) ohm, e como capacitores de *feedback* 5 (cinco)

capacitores com capacidades distribuídas logaritmicamente entre 470 pF e 4,7 µF.

[067] O circuito de calibração da impedância (2.e) tem a função de substituir de forma automática o objeto de estudo (3) pela resistência de calibração apropriada. O circuito de calibração da impedância (2.e) é composto por um A-Mux e um conjunto de resistores de calibração. Em uma das saídas do A-Mux encontra-se conectado o objeto de estudo (3) e nas saídas restantes do A-Mux encontram-se conectados os resistores de calibração, permitindo assim fazer a substituição de forma programável.

[068] Para fins de prototipagem e implementação foi aplicado como A-Mux um terceiro circuito integrado ADG728 da *Analog Devices* e como resistores de calibração 7 (sete) resistores com magnitudes distribuídas logaritmicamente entre 100 (cem) ohm e 1M (um mega) ohm.

[069] O circuito de comunicação serial (2.f) tem a função de fazer a ponte de comunicação entre o dispositivo de computação móvel (1) e os demais circuitos eletrônicos do espectrômetro de impedância elétrica (2). O circuito de comunicação serial (2.f) é composto por uma memória, um processador, uma interface de comunicação I2C e uma interface de comunicação compatível com o dispositivo de computação móvel (1). A memória armazena o algoritmo da espectroscopia de impedância elétrica, que consiste em cálculos e intercâmbios de mensagens com o dispositivo de computação móvel (1) e os demais circuitos eletrônicos do espectrômetro de impedância elétrica (2).

[070] Para fins de prototipagem e implementação foi aplicado como memória, processador e interfaces de

comunicação I2C e USB o microcontrolador programável Atmega2560 da *Atmel* no kit de desenvolvimento Arduino Mega da *Arduino*.

[071] O circuito de alimentação (2.g) tem a função de fornecer energia com a tensão apropriada a todos os componentes ativos do dispositivo espetrômetro de impedância elétrica (2). O circuito de alimentação (2.g) é composto por uma fonte de energia e um conjunto de reguladores de tensão. A fonte de energia pode ser uma rede elétrica (alimentação com fio) ou uma bateria (alimentação sem fio). Os reguladores de tensão transformam a tensão da fonte de energia para tensões compatíveis com os componentes do dispositivo espetrômetro de impedância elétrica (2).

[072] Para fins de prototipagem e implementação foi aplicado como regulador de tensão o circuito integrado 78L33 da *STMicroelectronics* e o mesmo microcontrolador programável Atmega2560 da *Atmel* no kit de desenvolvimento Arduino Mega da *Arduino* utilizado no circuito auxiliar de comunicação serial (2.f), o qual é alimentado através da mesma conexão USB utilizada para comunicação, sendo a bateria do dispositivo de computação móvel (1) a fonte de energia do sistema de medição de espectro de impedância elétrica portátil.

[073] A placa de conexão (2.h) tem a função de fazer as conexões elétricas entre os componentes do dispositivo espetrômetro de impedância elétrica (2). A placa de conexão (2.h) é composta por um material isolante, como fenolite, borracha ou vidro, coberto por conexões de um material condutivo, como metais ou alguns polímeros.

[074] Para fins de prototipagem e implementação foi aplicado como material isolante fenolite e como materiais condutivos cobre e estanho, formando um conjunto de placas de circuito impresso (PCB). Para fins de prototipagem e implementação foram aplicados como conexões entre as PCBs pinos de encaixe com espaçamento de 2,54mm, como apresentado na figura 5.

[075] O invólucro (2.i) tem a função de proteger os componentes do dispositivo espectrômetro de impedância elétrica (2) de poeira, umidade, contatos e impactos leves. O invólucro (2m .i) é composto por duas ou mais partes, capazes de se encaixar, formadas com um material rígido, polimérico ou metálico, e pode apresentar aberturas para a conexão do objeto de estudo (3), para comunicação (no caso de comunicação com fio), para alimentação (no caso de alimentação com fio) e para pinos ou parafusos de fixação ou encaixe.

[076] Para fins de prototipagem e implementação foi aplicado como material rígido poliácido láctico (PLA), formando um invólucro com dimensões externas de 48 (quarenta e oito) mm (altura) x 120 (cento e vinte) mm (largura) x 85 (oitenta e cinco) mm (profundidade), como apresentado nas figuras 6 e 7.

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

## REIVINDICAÇÕES

1. Sistema de medição de espectro de impedância **caracterizado** pelo fato de ser portátil, ser customizável e compreender:

- um dispositivo de computação móvel (1);
- um circuito de geração de frequência (2.a);
- um circuito de amplificação da saída (2.b);
- um circuito de amplificação da resposta (2.c);
- um circuito de cálculo da transformada discreta de Fourier (DFT) (2.d);
- um circuito de calibração da impedância (2.e);
- um circuito de comunicação serial (2.f);

2. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de o dispositivo de computação móvel (1) receber, armazenar e processar os dados das medições de espectroscopia de impedância elétrica do objeto de estudo (3) e comunicar os parâmetros da medida de espectroscopia de impedância elétrica ao circuito de comunicação serial (2.f).

3. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de o circuito de geração de frequência (2.a) gerar as frequências da medida de espectroscopia de impedância elétrica e compreender:

- um sintetizador digital direto (DDS).

4. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de o circuito de amplificação de saída (2.b) ajustar as tensões AC e DC do sinal de saída do circuito de geração de frequência (2.a) e compreender:

- uma amplificação programável;
- um resistor de input;

- um primeiro amplificador operacional (op-amp);
- um potenciômetro programável;
- um conversor digital-analógico (DAC); e
- um segundo op-amp.

5. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de o circuito de amplificação da resposta (2.c) amplificar o sinal de resposta e compreender:

- um op-amp;
- um multiplexador analógico (A-Mux);
- um conjunto de resistores de feedback; e
- uma amplificação programável.

6. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de o circuito de cálculo da DFT (2.d) converter o sinal processado pelo circuito de amplificação da resposta (2.c) para um sinal digital, calcular a DFT e compreender:

- um conversor analógico-digital (ADC);
- um núcleo de multiplicação e acumulação (M-Ac);
- um clock fixo;
- um clock programável;
- um filtro passa-baixa (LPF) fixo;
- um op-amp;
- um A-Mux;
- dois resistores auxiliares; e
- um conjunto de capacitores de feedback.

7. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de o circuito de calibração da impedância (2.e) substituir o objeto de estudo (3) pela resistência de calibração apropriada e compreender:

- um A-Mux; e
- um conjunto de resistores de calibração.

8. Sistema, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de o circuito de comunicação serial (2.f) realizar a comunicação entre o dispositivo de computação móvel (1) e os demais circuitos eletrônicos do espectrômetro de impedância elétrica (2) e compreender:

- uma memória;
- um processador;
- uma interface de comunicação I2C; e
- uma interface de comunicação compatível com o dispositivo de computação móvel (1).

9. Dispositivo de medição de espetro de impedância elétrica (2) **caracterizado** pelo fato de ser portátil, ser customizável e compreender:

- um circuito de geração de frequência (2.a);
- um circuito de amplificação da saída (2.b);
- um circuito de amplificação da resposta (2.c);
- um circuito de cálculo da DFT (2.d);
- um circuito de calibração da impedância (2.e);
- um circuito de comunicação serial (2.f);
- um circuito de alimentação (2.g);
- uma placa de conexão (2.h);
- um invólucro (2.i);

10. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de o circuito de geração de frequência (2.a) gerar as frequências necessárias para a medida de espectroscopia de impedância elétrica e compreender:

- um sintetizador digital direto (DDS).

11. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de o circuito de amplificação de saída (2.b) ajustar as tensões AC e DC do sinal de saída do circuito de geração de frequência (2.a) e compreender:

- uma amplificação programável;
- um resistor de input;
- um primeiro amplificador operacional (op-amp);
- um potenciômetro programável;
- um DAC; e
- um segundo op-amp.

12. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de o circuito de amplificação da resposta (2.c) amplificar o sinal de resposta e compreender:

- um op-amp;
- um multiplexador analógico (A-Mux);
- um conjunto de resistores de feedback; e
- uma amplificação programável.

13. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de o circuito de cálculo da DFT (2.d) converter o sinal processado pelo circuito de amplificação da resposta (2.c) para um sinal digital, calcular a DFT e compreender:

- um ADC;
- um núcleo M-Ac;
- um clock fixo;
- um clock programável;
- um LPF fixo;
- um op-amp;
- um A-Mux;

- dois resistores auxiliares; e
- um conjunto de capacitores de feedback.

14. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de o circuito de calibração da impedância (2.e) substituir o objeto de estudo (3) pela resistência de calibração apropriada e compreender:

- um A-Mux; e
- um conjunto de resistores de calibração.

15. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de o circuito de comunicação serial (2.f) realizar a comunicação entre o dispositivo de computação móvel (1) e os demais circuitos eletrônicos do espetrômetro de impedância elétrica (2) e compreender:

- uma memória;
- um processador;
- uma interface de comunicação I2C; e
- uma interface de comunicação compatível com o dispositivo de computação móvel (1).

16. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de o circuito de alimentação (2.g) fornecer energia com a tensão apropriada a todos os componentes ativos do dispositivo espetrômetro de impedância elétrica (2) e compreender:

- uma fonte de energia; e
- um conjunto de reguladores de tensão.

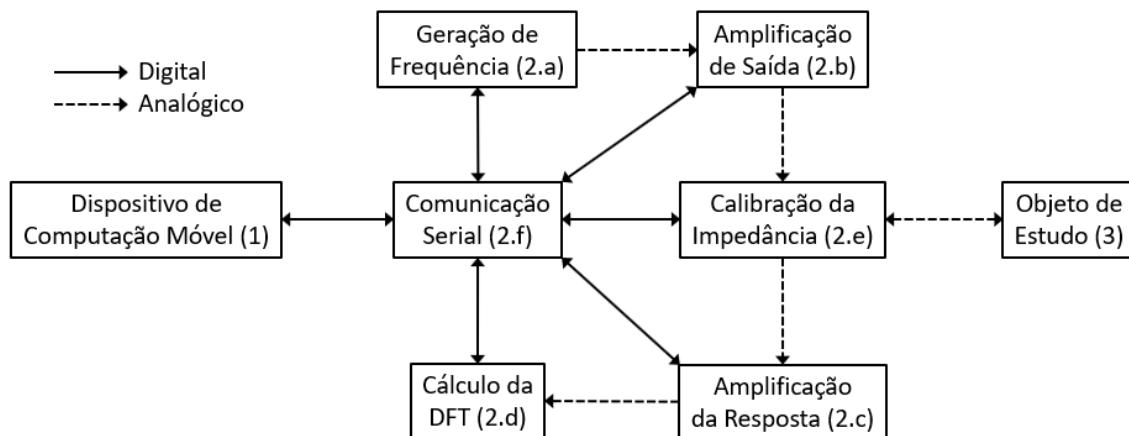
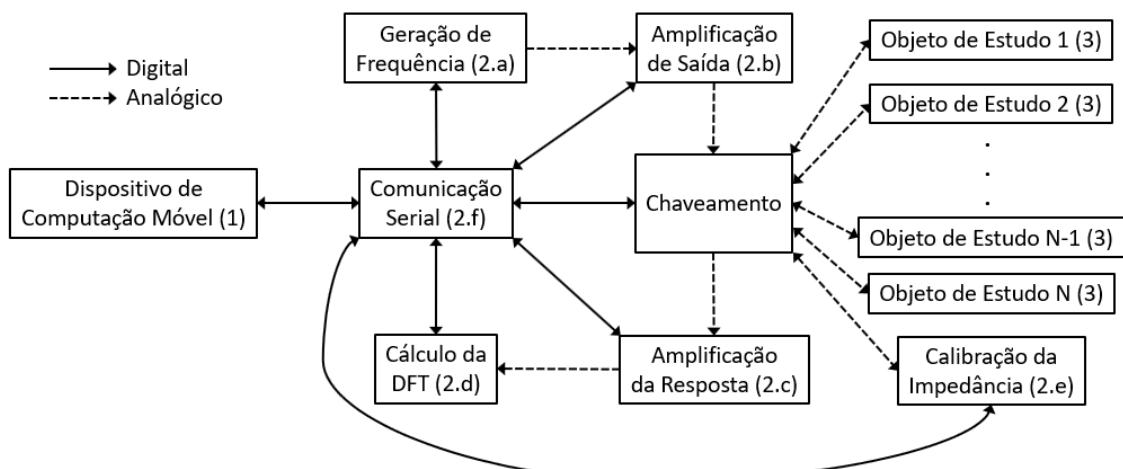
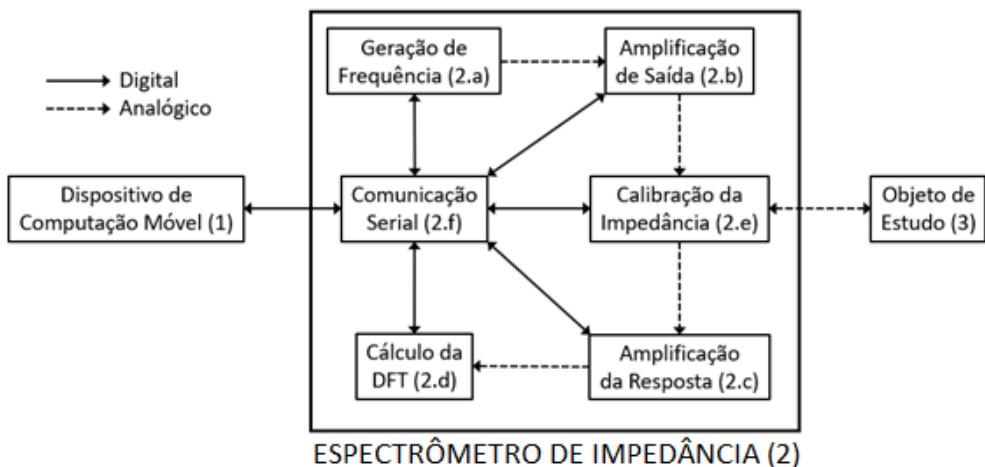
17. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de a placa de conexão (2.h) fazer as conexões elétricas entre os componentes do dispositivo espetrômetro de impedância elétrica (2) e compreender:

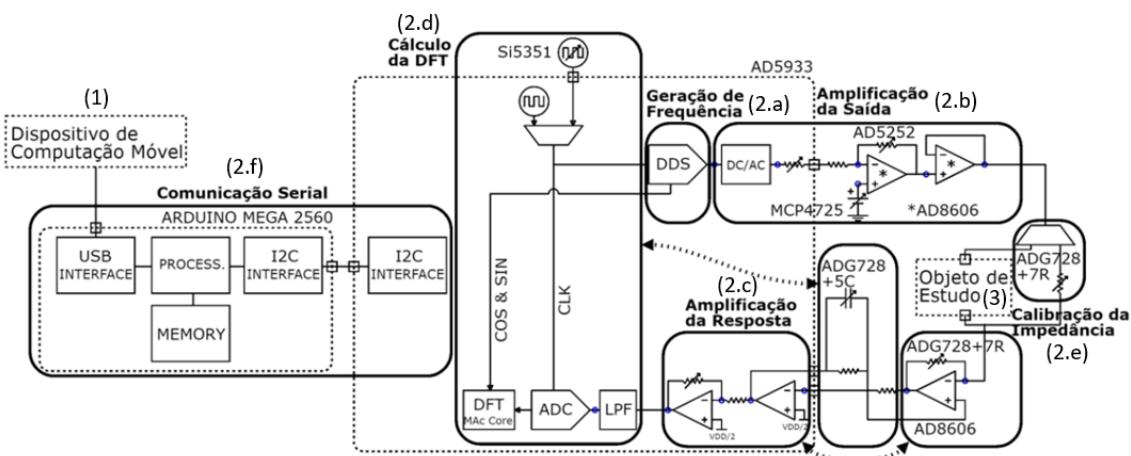
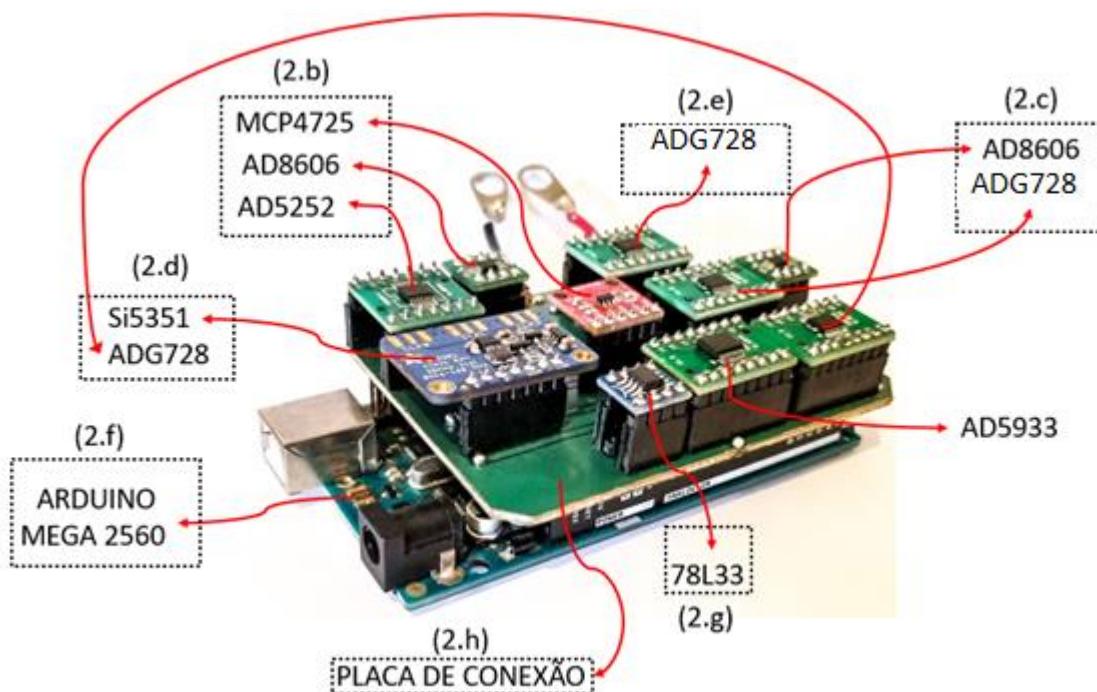
- um material isolante; e

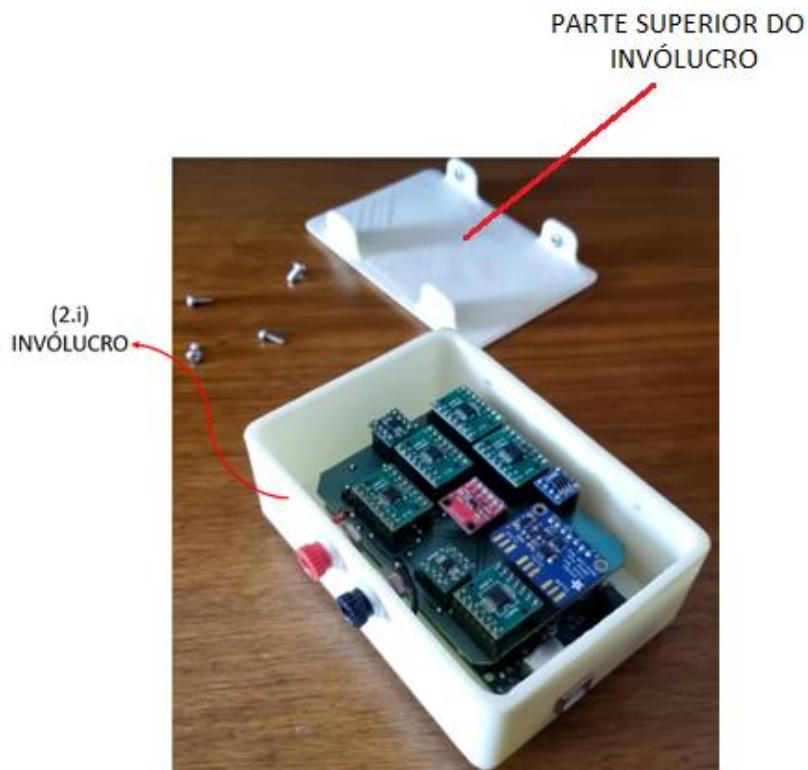
- um material condutivo.

18. Dispositivo, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado** pelo fato de o invólucro (2.i) proteger os componentes do dispositivo espectrômetro de impedância elétrica (2) de poeira, umidade, contatos e impactos leves e compreender:

- duas ou mais partes de material rígido.

**Figura 1****Figura 2****Figura 3**

**Figura 4****Figura 5**



**Figura 6**



**Figura 7**

RESUMO**SISTEMA E DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO DE ESPECTRO DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA PORTÁTEIS**

A presente invenção apresenta um sistema e um dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica portáteis e customizáveis, voltados para uso nos laboratórios de educação superior, nos laboratórios de pesquisa e em campo (in loco). Ambos o sistema e dispositivo compreendem um circuito de geração de frequência (2.a); um circuito de amplificação da saída (2.b); um circuito de amplificação da resposta (2.c); um circuito de cálculo da transformada discreta de Fourier (DFT) (2.d); um circuito de calibração da impedância (2.e) e um circuito de comunicação serial (2.f). Desse modo, o sistema e dispositivo de medição de espectro de impedância elétrica da presente invenção apresentam versatilidade de aplicação da espectroscopia de impedância elétrica para diversos materiais em que inclui novas estratégias para amplificação do sinal da saída, amplificação do sinal da resposta, cálculo da transformada discreta de Fourier (DFT), filtragem de interferências e calibração da impedância.