



República Federativa do Brasil
Ministério da Indústria, Comércio Exterior
e Serviços
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102015000624-1 A2

(22) Data do Depósito: 12/01/2015

(43) Data da Publicação: 19/07/2016



(54) **Título:** ESPECTRÔMETRO PARA USO EM SISTEMAS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA E SISTEMA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

(51) **Int. Cl.:** G01R 33/46; G01R 33/20; G01R 33/12; G01R 33/00; G01N 24/00

(52) **CPC:** G01R 33/46; G01R 33/20; G01R 33/12; G01R 33/0023; G01R 33/00; G01N 24/00

(73) **Titular(es):** UNIVERSIDADE DE SAO PAULO - USP

(72) **Inventor(es):** ALBERTO TANNÚS, ÉDSON LUIS GÉA VIDOTO, MATEUS JOSÉ MARTINS

(74) **Procurador(es):** MARIA APARECIDA DE SOUZA

(57) **Resumo:** ESPECTRÔMETRO PARA USO EM SISTEMAS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA E SISTEMA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA A presente invenção se insere na área de engenharia elétrica, mais precisamente se geralmente utilizado referindo a em sistemas um espectrômetro, de ressonância magnética. A presente invenção refere-se a um espectrômetro, para uso em sistemas de ressonância magnética que compreende um Field-Programmable Gate Array configurado de modo a gerar e adquirir sinais de ressonância magnética. Em uma configuração preferencial acima definido, o Field-Programmable configurado de modo a compreender um controlador temporal, um gerador de RF, do espectrômetro Gate Array é carregador, um módulo um de modulação de RF, e receptores síncronos em quadratura. Obviamente, tal espectrômetro conforme anteriormente definido pode ser utilizado em sistemas de ressonância magnética, como, por exemplo, um scanner de IRM, um sistema de RM Analítico e/ou um Relaxômetro de RM, além de um sistema de Ressonância Paramagnética Eletrônica e um Medidor de Campo Magnético (Gaussímetro) de alta resolução. A presente invenção soluciona os problemas(...)

**ESPECTRÔMETRO PARA USO EM SISTEMAS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA
E SISTEMA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA**

CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A presente invenção se insere na área de engenharia elétrica, mais precisamente se referindo a um espectrômetro, geralmente utilizado em sistemas de ressonância magnética.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO E ESTADO DA TÉCNICA

[002] Sistemas de Ressonância Magnética (RM) são uma designação para equipamentos destinados à execução de métodos de RM que geram sinais eletromagnéticos e campos magnéticos que são usados para observar quantidades físicas de sistemas de *spin* com momentos magnéticos dipolares ou multipolares resultantes diferentes de zero.

[003] Neste sentido, para o entendimento da presente invenção, é necessário descrever um equipamento de Ressonância Magnética (RM), que assim como vários outros equipamentos complexos, é constituído por várias partes. Cada uma dessas partes executa uma determinada função, umas mais complexas que outras, porém todas trabalham em sincronia para a finalidade principal do equipamento.

[004] Uma das partes principais em um equipamento de RM, apesar de não ser a mais dispendiosa, é o espectrômetro. Este tem como finalidade a geração de todos os sinais necessários à excitação dos núcleos (*spins*) sob observação, bem como a captação, demodulação, digitalização e transferência desses sinais a um computador, onde os dados serão posteriormente processados.

[005] O espectrômetro também se divide em vários subsistemas cada um executando uma função, de maneira

síncrona e temporalmente muito precisa. Normalmente tal equipamento é composto por um ou mais transmissores de radiofrequência (RF), em algumas configurações apresentando um a três, no máximo quatro, e em outras configurações podendo apresentar até 32 ou mais unidades.

[006] A eles seguem também geradores de forma de onda genérica, destinados a criar as formas de onda que irão gerar os pulsos de radiofrequência que podem ser modulados em amplitude, frequência ou fase, normalmente em mesmo número que os transmissores.

[007] O mesmo ocorre com os receptores de RF: em alguns casos apenas um, às vezes três e como scanners de Imagens por Ressonância Magnética (IRM, ou MRI) podem apresentar até 128 receptores. Apresenta também de três a quatro geradores de forma de onda genérica, destinados a criar as formas de onda que irão gerar o campo magnético espacialmente variável (gradiente) utilizado no equipamento de RM.

[008] Finalmente, apresenta um sequenciador de sinais com precisão temporal muito alta, que é o dispositivo responsável pela cadência de todo experimento de RM.

[009] Normalmente esses espectrômetros são constituídos por vários circuitos lógicos digitais, e quase sempre com tecnologia mista de processadores digitais de sinais (DSPs), e hardware específico para chaveamento em alta velocidade.

[010] Porém, com o passar do tempo esses sistemas torna-se obsoletos ou não permitem a sua reestruturação para o desenvolvimento de novas técnicas de aquisição de

dados, principalmente devido à rigidez da arquitetura envolvendo processadores disponíveis comercialmente.

[011] Os riscos encontram-se principalmente na perda da assistência e manutenção dos compiladores que acompanham esses dispositivos, que rapidamente se tornam obsoletos após a descontinuação da fabricação daqueles componentes. Soma-se a isso a pouca flexibilidade para a adição de novas funcionalidades, a impossibilidade de definir novas instruções no código executado e a grande latência entre requisição de informações e o efetivo atendimento dos fornecedores de tais produtos.

[012] Segue-se, portanto, uma estrutura pouco adaptável à evidência de novas necessidades, novas tecnologias e novos problemas representados pelos Métodos de RM.

[013] Alguns sistemas recentes utilizam a tecnologia de "*Field-Programmable Gate Array*" (FPGA). Esse componente permite que sejam criados circuitos digitais, simples ou complexos, através da descrição das suas conexões internas através de uma linguagem de descrição de hardware (HDL).

[014] Isto se faz a partir de primeiros princípios, montando-se as interconexões entre os dispositivos lógicos de uma FPGA tendo-se como base as equações booleanas que descrevem as relações entre saída e entrada, e ainda construindo as chamadas Máquinas de Estado, quando há a necessidade de iteração.

[015] Porém, esses componentes executam apenas parte das funções do espectrômetro, ficando o restante para outros componentes integrados que não permitem reprogramação de suas funções.

[016] Ademais, pode-se verificar que os sistemas de RM compreendem diversos subsistemas, além do espectrômetro, cada qual com atributos específicos e desenhados para atender a necessidades específicas e determinadas pelo Método de RM em questão.

[017] Entre os subsistemas geralmente utilizados nestes sistemas de RM, alguns exemplos são citados a seguir.

[018] Os sistemas normalmente compreendem um magneto principal, desenhado para gerar um campo magnético principal (B_0), necessário para permitir a existência do fenômeno de RM.

[019] Obviamente, magnetos podem existir em diversas formas construtivas e funcionais como, por exemplo, resistivos, permanentes, supercondutores, tecnologias mistas, entre outros, e fornecer intensidades de campo magnético desde muito pequenas (miliTesla) até muito grandes (dezenas de Tesla). Estes magnetos são tidos como o cerne e também o item mais dispendioso de um sistema de RM.

[020] Ainda, são geralmente utilizados transdutores de radio frequência (RF), do tipo transmissão, configurados de modo a impor sobre o sistema de *spins* um campo magnético oscilante muito intenso, quando sob influência do campo magnético principal (B_0).

[021] Também são utilizados transdutores de RF, do tipo recepção, configurados de modo a capturar os sinais de RF gerados pela precessão da magnetização de não equilíbrio que aparece após a excitação, geralmente extremamente fracos, durante a aquisição de dados num Método de RM.

[022] Pode-se adicionar a estes, transdutores de caráter dual, que servem tanto como transmissores quanto como receptores, apresentando características ponderadas entre estas duas funções.

[023] Ademais, os sistemas geralmente compreendem ainda amplificadores de potência de RF, configurados de modo a elevar a potência dos sinais de RF destinados a excitar o sistema de spins desde níveis padrão (~ zero dBm) até um alcance de 5 watts até 25 quilowatts ou mais, dependendo da demanda do Método de RM e da eficiência dos transdutores de transmissão de RF.

[024] Outros sistemas também compreendem conjuntos de bobinas, em particular um conjunto de bobinas de *Shimming*, usadas para promover uma melhor homogeneidade de campo magnético principal, juntamente com o conjunto de fontes de corrente de *Shimming*.

[025] Adicionalmente, também podem compreender um conjunto de bobinas de gradiente de campo magnético, configuradas de modo a gerar distribuições de corrente em chaveamento rápido com o objetivo de superpor uma variação espacial linear da componente B_z do campo magnético principal B_0 , ao longo dos três eixos coordenados, e assim chamados gradientes X, Y e Z. Os gradientes são normalmente utilizados para introduzir uma codificação espacial da informação (especificamente a fase da precessão da magnetização) sobre o sistema de spins, de forma a produzir Métodos de RM do tipo de Imagens, permitir a localização espacial em Métodos de Espectroscopia de RM de volume localizado e permitir a execução de Métodos de RM que envolvam conceitos de Difusão de spins. Gradientes são a

essência de sistemas de RM conhecidos como *scanners* de IRM, cuja principal aplicação é em estudos clínicos, porém não limitada a estes.

[026] Os sistemas podem compreender ainda amplificadores de corrente para gradientes, constituídos basicamente como amplificadores de áudio com funcionalidades especiais, configurados de modo a fornecer uma alta corrente de platô (tipicamente centenas de Amperes) e uma alta voltagem de transição (tipicamente centenas ou mesmo milhares de Volts), necessários para alimentar os conjuntos de bobinas de gradiente que representam cargas indutivas.

[027] Por fim, os sistemas de RM compreendem geralmente um módulo de travamento do campo (*field lock*), controle de rotação de amostras, indicadores de nível de fluidos criogênicos, posicionamento da cama do paciente, sistemas de temperatura variável para transdutores e outros subsistemas específicos dos experimentos e que fazem parte do sistema de RM.

[028] A execução de Métodos de RM normalmente compreende as etapas de:

- (a) Gerar sinais para os subsistemas de RF;
- (b) Gerar formas de onda (pulsos) para os subsistemas de gradiente ou de *shimming*;
- (c) Controlar a cadência dos sinais, usualmente com resolução temporal de sub-microssegundos, baseado em um programa executado em um Processador Digital de Sinais interno ao espectrômetro ou como parte do console de controle; e

(d) Adquirir os sinais de RM provendo filtragem, promediação, tomadas de decisão, conversão em frequência para a banda base, rotulação e transmissão desses dados a um console de processamento ou um dispositivo reconstrutor de imagens.

[029] Obviamente, tais etapas são todas efetuadas em sequência e em tempo real, ou seja, há pouco ou nenhum intervalo de tempo entre uma e outra.

[030] Neste sentido, podem ser citados alguns documentos de patente específicos para a tecnologia em questão como o documento brasileiro PI 0601165 A, ou os documentos chineses, CN 1900703 B, CN 101271076 B, CN 101820338 A, CN 102104427 A, CN 102353972 B, CN 102551722 B, CN 103455401 A, CN 103592611 A, CN 202477693 U, CN 202710740 U, CN 202794492 U, por exemplo.

[031] O documento brasileiro PI 0601165 A descreve um Controlador Programável (CP) que permite que um hardware seja reconfigurado executando assim diferentes funções de controle. O mesmo possui um sistema parametrizado, onde permite o uso de apenas um mesmo modelo de CP para a implementação de várias funções de hardware.

[032] Deste modo, este documento descreve um dispositivo a ser utilizado com conceitos de lógicas Programáveis Adaptativas. Estes dispositivos são normalmente encontrados em sistemas denominados Dinamicamente Reconfiguráveis. Por este motivo, este documento pode ser caracterizado como um entre muitos que descrevem controladores convencionais, que não possuem as configurações necessárias para executar Métodos de RM, tais como registradores específicos para manipulação da evolução

temporal de padrões binários, com dinâmica adequada para a contagem de tempo típica de Métodos de RM, que vai desde algumas dezenas de nano-segundos até várias dezenas de minutos.

[033] Já o documento chinês CN 103592611 A descreve um simulador de Ressonância Magnética de eco de sinais onde o processador principal é conectado com um módulo de FPGA. O mesmo é ligado à saída dos canais analógicos e gera uma simulação do sinal de ressonância magnética.

[034] Neste caso, a invenção descrita se trata de um simulador de sinais de RM, e não de um sistema de aquisição de sinais de RM. O sistema descrito pode ser interpretado como uma ferramenta de validação de um Espectrômetro Digital, por exemplo.

[035] Ademais, o documento CN 102353972 B descreve um espectrômetro de múltiplos canais digitais onde a unidade de controle é a FPGA.

[036] Apesar de mencionar um sistema de múltiplos canais, o conceito aqui se refere ao termo Multicanal (Multichannel Averager ou Multichannel Acquisition System ou Boxcar Averager) aplicado à contagem de impulsos provenientes do decaimento radioativo. Estes sistemas operam segundo o princípio de *Boxcar*, em que amostragens de diferentes amplitudes (energias) são acumuladas em diferentes "boxes", para no final representarem a distribuição estatística de energias ou outras correlações, um conceito totalmente distinto do aqui proposto.

[037] Pode-se ainda citar o documento CN 1900703 B, que descreve genericamente um equipamento digital de RM, sem detalhar sua forma de implementação.

[038] Neste caso, somente é possível deduzir que seja feita por meio de componentes digitais discretos, como pela proposta no parágrafo 21 daquele pedido, que descreve o uso de Sintetizadores Digitais de Frequência (Direct Digital Synthesizers, DDS) da Analog Devices, da família AD9xx e eventualmente filtros digitais discretos.

[039] Ademais, o documento CN 101271076 descreve uma abordagem antiga e comumente utilizada em sistemas híbridos, nos quais se encontram módulos compostos por um Digital Signal Processor (DSP) e dispositivos passivos de alta velocidade construídos (sintetizados) em FPGAs (essencialmente FIFOs e controle de entrada e saída de dados).

[040] Neste caso, a abordagem é também temerária, pois não permite que se faça alteração das formas de onda de forma dinâmica (*on the fly*), isto é, todas as formas devem ser calculadas a priori e colocadas na saída dos dispositivos de forma cadenciada controlada por algum sequenciador. Há também a limitação quanto à usabilidade de tais sistemas com alguns Métodos de RM que demandem um volume de dados muito grande para as formas de onda.

[041] Por fim, é possível citar o artigo "An FPGA-Based Single-Chip Gradient Calculation Module for Magnetic Resonance Imaging", do "Chinese Journal of Magnetic Resonance", vol. 27 N°2, de junho de 2010.

[042] Este documento descreve apenas o sistema de gradientes e não o sistema de RM completo dentro da FPGA. O sistema descrito apresenta diversas limitações, como, por exemplo, tempo fixo por estágio de 1.0 μ s com um total de 3.0 μ s, o fato de que as formas de onda só podem ser

escalonadas (única manipulação disponível) e após isso sofrer operação de rotação, não permitindo que se faça qualquer operação em tempo real. O sistema descrito no documento não apresenta correlação entre os gradientes X, Y e Z (correlações cruzadas: X em Y, X em Z, Y em X, Y em Z, Z em X, Z em Y), esta é uma deficiência comumente encontrada em sistemas desta natureza, que não permitem que se preveja na fase de geração das formas de onda as imperfeições encontradas no hardware (bobinas de gradiente de campo com contribuição de fluxo cruzado), na outra ponta da cadeia de geração de gradientes de campo. Ademais, não há evidência de parametrização, sendo assim uma configuração com arquitetura fixa, limitada a três gradientes, que não gera a correção do campo principal B_0 . A arquitetura proposta no documento em questão é de concepção primitiva, pois, limita as formas de onda a trapézios e não atende às exigências de scanners de RM atualmente utilizados em médio e alto campo. Assim, esse sistema utiliza a leitura de tabelas onde as formas de onda são pré-estabelecidas. Da mesma forma que as contribuições de fluxo cruzadas entre os gradientes de primeira ordem (X, Y e Z), os sistemas de gradiente também introduzem imperfeições na componente de campo principal (Z_0 ou B_0), X em B_0 , Y em B_0 e Z em B_0 , cuja correção dinâmica necessita ser prevista em geradores de gradiente como estes, o que não é o caso.

[043] Ademais, este documento descreve um modulo de pré-ênfase sequencial, isto é, cada constante de tempo é calculada e somada à anterior de forma progressiva, com acumulação de erro de quantização. Dessa forma apresenta

limitações quanto à velocidade e número de constantes de tempo capazes de ser processadas pelo estágio devido ao seu tempo fixo (1.0 μ s) de ciclo de execução. O número de constantes de tempo calculadas interfere na velocidade de amostragem (*sampling rate*) do dispositivo.

[044] Finalmente, a configuração descrita no documento em questão demanda o uso de um computador externo ao sistema para alimentar as formas de onda que deverão ser geradas. Não há forma visível de interação que permita realimentar o computador externo com informações do status da evolução da forma de onda corrente, e desta forma, este dispositivo não permite a intervenção *on the fly* nas características daquela forma de onda, o que é uma propriedade natural no sistema que propomos e extremamente desejável nos modernos experimentos de imagens por RM.

[045] Deste modo, nenhum dos documentos anteriores soluciona os problemas inerentes ao estado da técnica, ou seja, nenhum dos documentos consegue proporcionar um sistema e método para uso em RM que apresente um caráter holístico, um sistema parametrizado, imunidade à obsolescência e escalabilidade.

VANTAGENS E MODIFICAÇÕES

[046] Diante do acima exposto, a presente invenção soluciona os problemas inerentes ao estado da técnica, ou seja, consegue proporcionar um sistema e método para uso em RM que apresenta: um caráter holístico, em que o conjunto de subsistemas considerado essencial para qualquer que seja a configuração desejada, seja um simples Relaxômetro, ou ainda um Espectrômetro de RM Analítico, até sua versão mais sofisticada de um Scanner de IRM, encontram-se sintetizados

ou são passíveis de sintetização customizada dentro de uma única FPGA; um sistema parametrizado, em que qualquer alteração que for necessária como, por exemplo, a substituição de um dispositivo periférico como os conversores DAC para os canais de gradientes, são imediatamente adaptadas mediante a simples alteração de poucos parâmetros, sendo um exemplo a dinâmica dos conversores determinada pelo número de bits de conversão; imunidade à obsolescência devido a sua grande suscetibilidade à incorporação de novas funcionalidades, pois diferentemente de um sistema constituído exclusivamente por hardware não sintetizado, nosso sistema pode ter toda a sua configuração alterada e recompilada em menos que meio período de um dia (uma manhã ou uma tarde); e escalabilidade, ou seja, o advento de aplicações que demandem um maior número de transmissores ou de receptores, como modernas técnicas de aplicação clínica de imagens por RM em altos campos magnéticos (igual ou superior a 3.0 Teslas), torna-se possível modelar o sistema para acompanhar a demanda por transdutores com um grande número de canais de transmissão ou de recepção. Neste sentido, como o sistema é parametrizado e escalonável, é possível instanciar um número de transmissores ou de receptores apenas limitado pela quantidade de recursos disponibilizados pelo modelo ou família de FPGA.

[047] Essa solução inclui, ainda, todas as componentes na matriz de rotação e correções cruzadas, suprindo cada um dos canais com as contribuições dos canais remanescentes.

BREVE DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

[048] A presente invenção refere-se a um espectrômetro, para uso em sistemas de Ressonância Magnética que compreende um *Field-Programmable Gate Array* configurado de modo a gerar e adquirir sinais de Ressonância Magnética.

[049] Em uma configuração preferencial do espectrômetro acima definido, o *Field-Programmable Gate Array* é configurado de modo a compreender um carregador, um controlador temporal, um gerador de RF, um módulo de modulação de RF, e receptores síncronos em quadratura.

[050] Obviamente, o módulo de modulação de RF é AM, FM e/ou PM, e o espectrômetro pode compreender diversos módulos distintos, como, por exemplo, um módulo de geração de formas de onda arbitrárias, em que tal módulo de geração de formas de onda arbitrárias é configurado de modo a realizar a criação do campo de gradiente magnético (GR, GS, GP), um módulo de rotação para os geradores de forma de onda, um misturador de formas de onda, um módulo de pré-ênfase para os geradores de forma de onda, um módulo de rotação para os geradores de forma de onda, um módulo de rotulagem e enfileiramento dos dados dos receptores, um módulo de priorização para os possíveis módulos de transferência, um módulo autônomo de transferência por USB, um módulo autônomo de transferência por Ethernet, um módulo autônomo de transferência por RS-232, um módulo de roteamento de FI de referência (*FI Grid*), e ainda módulos auxiliares selecionados entre um grupo que compreende: controle de temperatura e monitoração da FPGA; correção de campo e homogeneidade, triggers de entradas e saídas;

monitoração de sinais vitais; gate respiratório; sincronização com rotor; controle e monitoração de uma cama de um paciente; multiplexador de condições de exceção de hardware.

[051] Obviamente, tal espectrômetro conforme anteriormente definido pode ser utilizado em sistemas de Ressonância Magnética, como, por exemplo, um scanner de IRM, um sistema de RM Analítico e/ou um Relaxômetro de RM.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[052] O espectrômetro da presente invenção integra todos os subsistemas digitais que constituem um espectrômetro e adicionalmente outros subsistemas utilizados normalmente em apoio, em um único circuito integrado FPGA, cujas funções podem ser criadas, modificadas, replicadas e reutilizadas, já que as mesmas são descritas e compiladas a partir de uma linguagem (HDL), adquirindo, portanto, os caracteres modular e parametrizado.

[053] Deste modo, é previsto um método de parametrização das propriedades dos subsistemas, o que faz com que qualquer alteração, seja ela de caráter escalonável (definido um, tem-se definidos todos de uma série de dispositivos análogos) ou ainda a habilidade de atender a eventuais alterações dos periféricos de natureza mista, como conversores analógicos-digitais (ADCs) e digital-analógicos (DACs). Por exemplo, a dinâmica destes dispositivos é facilmente ajustada ao espectrômetro mediante a simples alteração de um ou dois parâmetros que determinam tamanho de seus registros.

[054] Neste sentido, apenas os conversores digitais para analógico (DAC) e os conversores analógicos para

digital (ADC) e poucos outros conversores de mídia como Ethernet/USB são necessários.

[055] Mesmo estes são conectados através de unidades físicas (PHY), e qualquer mudança de tecnologia poderá ser atendida bastando trocar as placas que contêm estes componentes. A verdadeira inteligência do processo encontra-se sintetizada dentro da FPGA, e é ela quem determina a verdadeira funcionalidade do sistema.

[056] Neste sentido, a presente invenção pode ser definida como um espectrômetro para uso em sistemas de Ressonância Magnética que compreende um *Field-Programmable Gate Array* (FPGA) configurado de modo a gerar sinais para os subsistemas de RF, gerar formas de onda (pulsos) para os subsistemas de gradiente ou de *shimming*, controlar a cadência do experimento, e adquirir os sinais de RM.

[057] Adicionalmente, o FPGA preferencialmente é configurado de modo a prover a filtragem, promediação, tomadas de decisão, conversão em frequência para a banda base, rotulação e transmissão desses dados a um console de processamento ou um dispositivo reconstrutor de imagens.

[058] Adicionalmente, o espectrômetro em questão é modular e, assim, pode compreender diversos subsistemas internos inerentes à configuração de *software/hardware*. Tais módulos podem ser adicionados ou com o propósito de simplificá-lo, diminuindo o custo do equipamento, ou ainda tornando o equipamento altamente sofisticado com vários canais e funções.

[059] Assim, o espectrômetro pode compreender: um carregador (*loader*); um controlador temporal (*Timing Sequencer* - TS); um gerador de RF; um módulo de modulação

de RF (AM, FM e PM); um módulo de geração de formas de onda arbitrárias destinadas à criação do campo de gradiente magnético (GR, GS, GP); um módulo de rotação para os geradores de forma de onda; um misturador de formas de onda; um módulo de pré-ênfase para os geradores de forma de onda; receptores síncronos em quadratura; um módulo de rotulagem e enfileiramento dos dados dos receptores; um módulo de priorização para os possíveis módulos de transferência; um módulo autônomo de transferência por USB; um módulo autônomo de transferência por Ethernet; um módulo autônomo de transferência por RS-232, normalmente utilizado apenas para depuração; um módulo de roteamento de FI de referência (*FI Grid*); além de módulos auxiliares, controle de temperatura e monitoração da FPGA; e módulos auxiliares para controle de outros subsistemas externos, como a correção de campo e homogeneidade, triggers e entradas e saídas para uso genérico, monitoração de sinais vitais e sua correlação para o estabelecimento de trigger cardíaco e *gate* respiratório, sincronização com rotor para experimentos de *Magical Angle Spinning* (MAS), controle e monitoração da cama do paciente, multiplexador de condições de exceção de hardware (potência excessiva, máximo *slew rate* atingido, limiar de temperatura, enfim, uma grande quantidade de dispositivos e sinais que podem ser acionados ou monitorados).

[060] Todas essas funções são de responsabilidade direta do *Timing Sequencer*, e são associadas a determinadas linhas de entrada e saída (I/O) daquele DSP, desenhadas especificamente para atender a estes sistemas auxiliares. Vale ressaltar que nenhum dispositivo conhecido atualmente

permite concentrar este tipo de controle ao *Timing Sequencer* da forma como realizada pela presente invenção.

[061] Uma explicação sobre cada módulo é realizada a seguir.

[062] O carregador tem como função principal comunicar-se com um computador externo, recebendo comando e enviando as respostas. O mesmo permite o carregamento dos programas ou valores dinâmicos dos outros módulos, leitura desses valores, verificação do estado de funcionamento ou erro dos módulos e iniciar a execução dos módulos que dispõem de processadores.

[063] O carregador pode receber comandos de qualquer uma das interfaces externas, Serial, USB ou Ethernet, enviando a resposta apenas à interface que solicitou o comando, quando duas ou mais interfaces estão ativas.

[064] Assim, o carregador preferencialmente dispõe de uma linguagem simples o que permite fácil depuração dos módulos instanciados, não sendo necessária sua modificação com a remoção ou adição de mais módulos.

[065] Já o controlador temporal (*Timing Sequencer* - TS) permite gerar sinais em tempo real e habilitar a geração de sinais de outros módulos, com precisão temporal preferencialmente de duas dezenas de nano segundos.

[066] Tal módulo pode ser constituído de um processador proprietário (por exemplo, do tipo CIERMag, desenvolvido exclusivamente para essa função, com estrutura RISC (*Reduced Instruction Set*) encadeada (pipeline)). Tal módulo é configurado de modo a compreender executar grupos de instruções e compreender registradores ampliáveis, bem como possibilidade de interrupção, laços (loops), entre

outros, todos desenvolvidos com base na especificidade da sua aplicação em experimentos de RM, portanto não encontram similares em produtos disponíveis atualmente no mercado de *Digital Signal Processors* (DSPs).

[067] Por ser parametrizado o número de bits que o mesmo controla, bem como tamanho dos registradores, instruções, sinais de entrada, entre outros, estes DSPs são facilmente reconfiguráveis, bastando modificar o valor de cada um daqueles parâmetros e recompilar a síntese do seu hardware descrito em VHDL.

[068] O espectrômetro pode compreender ainda um módulo gerador de RF, que tem como função a geração digital do sinal de RF em fase e quadratura com uma referência interna ou externa à FPGA. Também parametrizado, permite a mudança do número de bits, cálculo das formas de onda senoidais ou cossenoidais automaticamente com a mudança daqueles valores.

[069] O gerador permite mudar dinamicamente sua frequência base, ângulo entre as componentes em fase e quadratura (isso permite corrigir imperfeições dos sistemas analógicos externos à FPGA) e deslocamento (*offset*) da fase inicial, bastando que o carregador altere esses valores de forma estática.

[070] Ademais, o gerador possibilita também a modulação do seu sinal de RF em amplitude com banda lateral, superior ou inferior, suprimida (AM/SSB), com ou sem interpolação do sinal modulante AM. O fator de interpolação também pode ser mudado dinamicamente. O gerador permite a modulação em fase (PM) e modulação em frequência (FM) com fase contínua. Como o gerador é formado

por dois osciladores numéricos, permite que quando modulado em FM e retorne à sua frequência base, esse retorno ocorra com fase contínua ou com a fase que deveria ter se não tivesse sido modulado em FM, característica única em geradores de RF, mas muito importante para experimentos de RM. Esse controle é executado em tempo real pelo TS.

[071] Ainda, o espectrômetro pode compreender módulos de modulação de RF (AM, FM e PM). Esses módulos são os geradores das formas de onda arbitrárias, destinado ao gerador de RF, como modulantes de AM, FM e PM.

[072] Preferencialmente, são constituídos por versões expandidas do TS, também parametrizados e com número de bits diferentes entre os mesmos, visto que a modulante em FM necessita de uma dinâmica maior que a de AM e esta por sua vez necessita uma dinâmica maior que a modulação de PM. Por exemplo, o espectrômetro pode compreender 24 bits para modulação FM, 16 bits para AM e apenas 12 para PM. Isso permite, mas não limita, uma modulação de $\pm 3,125$ MHz, ± 32767 passos de amplitude e $\pm 180^\circ$ de fase com passos de $0,088^\circ$.

[073] Esses processadores também seguem a filosofia RISC, com barramento de dados e instruções separados. Na memória de dados são armazenadas as formas de onda básicas destinadas à geração dos sinais arbitrários.

[074] O espectrômetro pode compreender ainda um módulo de geração de formas de onda arbitrárias e/ou criação do gradiente de campo magnético.

[075] Neste sentido, as técnicas de RM necessitam da criação de um campo magnético variável com o tempo e com o espaço (gradiente da componente B_z do campo magnético

principal B_0). Assim, os geradores têm como função criar esse sinal temporal, com formas de onda arbitrárias, mas temporalmente precisos. Os geradores são formados por uma versão expandida do TS. Porém, ao contrário dos geradores das modulantes de RF, todos apresentam o mesmo número de bits nos registradores, mas como são parametrizados essa não é uma característica imutável.

[076] Em RM esses sinais costumam ser chamados de gradientes lógicos, pois são os sinais gerados que apresentam funções lógicas nas técnicas de RM. Normalmente são chamados de gradiente de leitura (GR), gradiente de fase (GP) e gradiente de seleção (GS).

[077] Ademais, o espectrômetro pode compreender um módulo de rotação para os geradores de onda. Assim, os sinais oriundos dos geradores das formas de onda dos gradientes lógicos (GR, GS e GP) necessitam ser convertidos para sinais que irão alimentar os gradientes físicos. É também necessário que o gradiente final possa definir uma orientação final girada em torno de qualquer um ou mais dos seus eixos do espaço real (X, Y e Z).

[078] Assim um processador semelhante ao do TS pode ser utilizado para tal função. Com todas as características de parametrização e configuração, permite em tempo real a rotação dos sinais lógicos através de uma matriz de rotação. Os sinais oriundos da matriz de rotação são denominados G_x , G_y e G_z ,

[079] Adicionalmente, o espectrômetro pode compreender um módulo misturador de formas de onda, em que os sinais gerados pelo módulo de rotação G_x , G_y e G_z , uma vez amplificados, destinam-se às bobinas de gradiente,

dispositivos que transformam corrente em campo magnético. Como essas bobinas podem apresentar problemas de interação entre as mesmas, devido à imperfeição na construção ou outros fatores, essas interações entre as suas componentes necessitam de correções.

[080] Assim, um misturador permite que ao sinal de uma componente sejam adicionadas partes das outras componentes com a intenção de corrigir tais efeitos. Além das componentes principais misturadas (G_x' , G_y' e G_z'), o misturador permite a geração de outra componente destinada à correção do campo magnético principal, chamada de B_0 , cujo sinal é criado com fatores proporcionais aos sinais principais G_x , G_y e G_z . Esse módulo apresenta os valores de ganho, e proporcionalidade dinamicamente configurável pelo carregador.

[081] Ainda, o espectrômetro pode compreender um módulo de pré-ênfase para os geradores de onda. Após os sinais serem misturados no módulo misturador, cada um desses sinais pode ser direcionado para um conjunto de filtros digitais de pré-ênfase, cada uma com uma constante de tempo. Isso permite a correção de qualquer efeito de interação entre as bobinas de gradientes e o meio físico condutor próximo à posição em que as mesmas se encontram.

[082] O número de componentes por canal pode ser parametrizado, porém o ganho e as constantes de tempo são dinamicamente alteráveis pelo carregador.

[083] Outro módulo que pode ser configurado no espectrômetro é o módulo de receptores síncronos em quadratura.

[084] Este módulo é responsável pela demodulação síncrona dos sinais de RM captados. Com base no sinal proveniente do gerador de RF principal ou de um dos outros geradores de RF, o sinal é misturado de forma síncrona, filtrado e dizimado com a utilização de um filtro CIC (*Cascade Integrator Comb*).

[085] Após a filtragem inicial o sinal é passado por um filtro FIR (*Finite Impulse Response*), para correção da resposta em frequência do filtro CIC, outro circuito de dizimação e mais um filtro FIR adicional, sem dizimação posterior definida por hardware. O sinal resultante, em fase e quadratura, é armazenado em FIFOs (*First in First Out*) para sincronização com o restante dos outros módulos.

[086] O número de dizimação máximo, ambos do CIC e do dizimador intermediário, são parametrizados, bem como o número máximo de estágios (*taps*) dos filtros FIR e o tamanho das FIFOs.

[087] O fator de dizimação corrente do CIC e do dizimador intermediário, bem como o fator de correção do ganho do CIC, o número corrente de taps e das constantes dos FIR são dinamicamente configuráveis pelo carregador. Caso o fator de dizimação do dizimador intermediário ou o número de taps dos filtros FIR sejam colocados em zero, esses sistemas simplesmente repassam o sinal da entrada para a saída (*by-pass*) sem modificação. Assim, o receptor tem fator de dizimação, frequência de filtragem, bem como número de estágios dinamicamente alteráveis.

[088] Adicionalmente, o espectrômetro pode compreender um módulo de rotulagem e enfileiramento dos dados dos receptores.

[089] Como o espectrômetro pode ser projetado para admitir operação com mais de um receptor, os dados de cada um deles devem ser rotulados e dispostos em sequência para que possam ser recebidos pelo computador do equipamento de RM (console de operação).

[090] Como o número de receptores ativos em uma sequência (ou Método de RM, que representa um experimento de RM) pode ser diferente do da sequência seguinte, o rotulador também deve ser dinamicamente reprogramado com o número de receptores ativos, a sequência com que os dados devem ser enviados, o tamanho de cada sequência e os rótulos a serem utilizados por cada receptor ativo.

[091] Finalmente após montar cada bloco de dados, o rotulador os envia para a unidade de prioridade de transferência.

[092] Estas características simplificam enormemente o manuseio de dados, particularmente quando se utiliza o espectrômetro como scanner de IRM (MRI) com múltiplos receptores, onde aparece a necessidade de identificação dos dados provenientes de cada um deles no momento de processá-los.

[093] Ademais, outro módulo que pode estar presente é o módulo de prioridade para os possíveis módulos de transferência. O módulo de prioridade recebe os dados do rotulador e envia à unidade de transferência com maior velocidade de transferência disponível e ativa.

[094] A unidade de prioridade, por sua vez, recebe informações das unidades de transferência quanto a sua disponibilidade, estado dos seus buffers internos e se a

mesma foi ativada pelo computador do sistema, isto é, foi programada para enviar dados.

[095] Esta forma de operação faz com que a escolha entre comunicação via USB ou Ethernet seja automaticamente estabelecida sem necessidade de intervenção do operador ou mantenedor do sistema, bastando apenas estabelecer a presença de uma ou ambas as conexões com o console de operação.

[096] Ainda, um módulo autônomo de transferência por USB também pode ser configurado no espectrômetro em questão. Este módulo USB é totalmente autônomo não necessitando de qualquer intervenção do espectrômetro.

[097] O módulo pode ser constituído, por exemplo, por um processador RISC de 16 bits de instrução e 32 de dados o qual permite estabelecer uma comunicação com o computador principal para transferências tipo *bulk*.

[098] Ao receber dados em seus buffers o módulo efetua a transferência totalmente assíncrona com o espectrômetro. O número de dados nos buffers, o estado das transferências e a disponibilidade podem ser monitorados pelo carregador.

[099] Um módulo semelhante, o módulo autônomo de transferência por Ethernet, protocolo UDP, também pode ser configurado. O módulo Ethernet Gigabit autônomo é constituído apenas de lógica digital (hardware de comutação em alta velocidade) e não possui processador, permitindo obter a máxima velocidade de comunicação em um protocolo Ethernet/UDP (*User Datagram Protocol*).

[100] Para que o mesmo possa ser localizado e programado, ele pode responder também ao protocolo ARP

(*Address Resolution Protocol*), para informar seu endereço MAC (*Media Access Control*).

[101] Após receber um pacote UDP de configuração pelo computador do sistema a interface armazena o MAC destino e estabelece uma comunicação com o mesmo. Isso passa a interface para modo habilitada e passível de ser escolhida pela unidade de prioridade.

[102] A unidade pode possuir também buffers que podem ser monitorados pelo carregador, bem como o estado dos vários blocos desse módulo.

[103] Outro módulo de comunicação é o módulo autônomo de transferência por RS-232. Este módulo apresenta prioridade baixa e é principalmente utilizado para depuração e não para transferência de dados. Com esse módulo o usuário pode comunicar-se com o carregador e questionar ou modificar valores dinâmicos, utilizando qualquer programa que emule um terminal. Permite a ligação a uma interface serial RS-232C, 115200 *baud*, sem paridade, 1 stop bit, controle de fluxo por hardware, por exemplo.

[104] A velocidade e outras características são parametrizadas, podendo ser modificadas conforme a necessidade do usuário.

[105] Ainda, o espectrômetro pode compreender um módulo de roteamento de FI de referência (FI Grid). Quando se utilizam múltiplos transmissores e múltiplos receptores, a definição da relação entre cada receptor e sua respectiva referência constitui uma tarefa complexa, e para isto constitui-se uma matriz de roteamento de forma que os receptores escolhidos para operar com uma determinada

espécie atômica estejam correlacionados com seus respectivos transmissores.

[106] Desta forma, este módulo tem a propriedade de dirigir, conforme o modo de operação programado para cada conjunto de transmissores e receptores, as frequências de referência de maneira apropriada. Por exemplo, quando se opera com um único transmissor e múltiplos receptores, caracteriza-se o modo de operação em que a referência do transmissor é roteada para os M receptores utilizados.

[107] Esta é a forma de operação de um sistema de IRM com transdutores de recepção configurados como *phased arrays*. Na operação como um sistema analítico, podem ser definidos até quatro transmissores e quatro receptores, e o módulo irá configurar as referências apropriadamente, na forma requerida por um experimento de múltiplos núcleos. A forma mais simples é o módulo roteando a FI de referência de um único transmissor para um único receptor, como na operação como um Relaxômetro.

[108] Por fim, o espectrômetro pode ainda compreender um módulo para sistemas auxiliares. Os sistemas auxiliares constituem-se em uma grande variedade de módulos que podem ser instanciados conforme o tipo de espectrômetro desejado pelo usuário, de uma versão mais simples a uma mais sofisticada.

[109] Podem ser simples e autônomos como controladores I2C para medir a temperatura do chip da FPGA ou do espectrômetro e ligar ou desligar ventoinhas, informando ao carregador esses valores, ou mesmo sistemas mais complexos com dezenas de canais para correção da homogeneidade do campo magnético principal (*shimming*).

[110] Diante do acima exposto, a presente invenção apresenta diversas vantagens em relação ao estado da técnica, como, por exemplo, a diminuição de energia, potência dissipada, tamanho, resistência à obsolescência, escalabilidade e principalmente custo. Em termos da obsolescência, a mesma fica muito reduzida, pois poucos componentes externos são necessários.

[111] Por ser modular, nosso espectrômetro aqui descrito permite que subsistemas sejam integrados, removidos ou duplicados com a simples instanciação do mesmo no código com a devida redefinição de entradas e saídas. Essa característica permite adaptar o espectrômetro às necessidades do usuário. A parametrização tem como característica permitir que, com apenas a mudança do valor de parâmetros dentro do código HDL, haja a modificação de várias interconexões, tamanho de dutos, número de bits, etc.

[112] Este sistema faz parte de uma concepção que já no seu desenho permite executar determinadas funcionalidades que o caracterizam como único na sua classificação. A forma com que foi concebido faz com que ele possa responder, juntamente com o *software* imediatamente acima, que representa um *Hardware Abstraction Layer* (HAL), como um servidor de experimentos. Isto faz com que seja possível utilizá-lo com diferentes consoles. Esta funcionalidade abre perspectiva para utilizar o espectrômetro em questão em um ambiente de ensino, onde um número de estudantes pode acessar o sistema de uma sala de aulas, por exemplo, e o espectrômetro pode estar em outro lugar assistido por um técnico ou operador (para trocar de

amostras, sintonizar transdutores etc.) e próximo de um link Gigabit Ethernet.

[113] Por outro lado, vários espectrômetros distintos podem ser acessados por um único console de operação e um único operador no controle de todos os espectrômetros, o que tornaria mais práticas e baratas as plantas que utilizam vários espectrômetros, mesmo que em diferentes campos magnéticos.

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

[114] A seguir, serão descritos alguns exemplos de aplicação para o presente espectrômetro.

[115] Scanner de IRM (MRI): A forma mais complexa que um espectrômetro de ressonância magnética pode assumir é a de um sistema configurado de modo a gerar imagens e executar Métodos de Espectroscopia de RM *in vivo*.

[116] É essencial nesta aplicação um módulo de roteamento de FI de referência, que define a operação de múltiplos transmissores e múltiplos receptores como uma única FI (normalmente para Hidrogênio), podendo ainda ser conformado para operar com excitação e recepção em frequências correspondentes a diferentes núcleos, por exemplo, Hidrogênio e Fósforo, Carbono, Lítio, ou quaisquer combinações de espécies atômicas que se queira considerar.

[117] Um exemplo notável de subsistema que é característico dessa configuração, mas não exclusivo dela, é o módulo de geração de formas de onda para gradientes de campo magnético. Neste exemplo, podem ser utilizados, por exemplo, quatro canais de gradiente (X, Y, Z e B_0 , este último gerado a partir de informações dos três primeiros). Contudo, a mesma abordagem de dispositivos de modulação ou

chaveamento rápido de bobinas corretoras de homogeneidade de campo magnético, poderá ser estendida até, por exemplo, o número de 16 canais, ficando os 12 restantes ocupados com correção (*shimming*) de até 3ª ordem em Z, além das componentes transversais. Tal atributo visa resolver os problemas apresentados pela convergência desses sistemas a operar em campos magnéticos cada vez mais intensos. O aumento da intensidade de campo magnético, atualmente em 7.0 Teslas para humanos, mas com intensidade superior a 11.0 Teslas em sistemas pré-clínicos, dá lugar a efeitos que contribuem para a inomogeneidade de campo magnético induzida pela própria presença do objeto de estudos, normalmente um sistema biológico de constituição heterogênea. Este efeito, conhecido como contribuição de susceptibilidade, requer correções de homogeneidade cuja solução ótima seja localizada, não servindo, portanto para todo o volume estudado. Assim, com a correção dinâmica de *shimming* do nosso sistema pode prover uma solução que passa a ser propriedade da fatia selecionada, num experimento *multislice*. Esta característica, associada ao conceito já descrito de escalabilidade, pode ser estendida até ao número total de canais de *shimming*, caso seja necessário.

[118] É atributo de um espectrômetro nesta configuração promover excitação dos núcleos em estudo utilizando os conceitos de *phased arrays*, normalmente utilizados na recepção com múltiplos receptores. Neste caso, nosso sistema provê canais de geração de RF, modulação em AM, FM e PM nas quantidades requeridas por modernos experimentos de Imagens, com limite apenas determinado pela capacidade de recursos da família de FPGA

escolhida para sintetizá-los. Desta forma, aproveitando a propriedade descrita como escalabilidade, a alteração da configuração do sistema para um número maior de transmissores ou receptores depende apenas daquele critério.

[119] Um dos módulos que desempenha um papel muito importante é o dispositivo de comunicação com o console do espectrômetro, pois é do seu desempenho que depende a execução de métodos de aquisição rápida de imagens como *Echo Planar Imaging* (EPI), base de todos os estudos de imagens funcionais, principal ferramenta para a Neurociência moderna. Desta forma, destaca-se o desempenho dos módulos responsáveis pela dinâmica da transferência rápida de informação entre o espectrômetro e seu console de operação.

[120] Outro destaque pode ser dado ao módulo de (múltiplos) receptores, configurados de modo a operar de maneira integrada ao dispositivo em que se encontra sintetizado todo o espectrômetro, mas passível de ser exportado para um dispositivo concentrador, atuando desta forma numa configuração conhecida como receptores distribuídos. Estes receptores possuem características que lhes confere a especificação necessária para a obtenção de imagens 3D, normalmente associada a uma dinâmica da ordem de 100 dB, com espúrios inferiores a -80 dBm.

[121] Assim configurado, este sistema pode executar quaisquer que sejam os Métodos de Imagens e Espectroscopia *in vivo* de Volume Localizado conhecidos, executando tais métodos com o apoio de recursos como processadores

especializados, uma linguagem de definição de sequências de pulsos e um compilador.

[122] Sistema de RM Analítico: Outro exemplo de aplicação de tal espectrômetro é um sistema analítico constituído de módulos idênticos aos utilizados no exemplo descrito anteriormente, limitado, contudo pela ausência dos sistemas de modulação de gradientes. É possível, contudo, que estes módulos estejam presentes caso haja a previsão de estudos de difusão de *spins*, supressão de solvente etc.

[123] Neste caso, uma versão simplificada do espectrômetro pode ser utilizada como um sistema analítico para espectroscopia de RM. Observa-se que as principais alterações encontram-se nos módulos de geradores de gradientes de campo magnético, bem como a destinação específica dos transmissores e receptores para a operação com Hidrogênio e Núcleos X (outras espécies atômicas).

[124] A principal diferença nesta configuração é que o número de transmissores é limitado a quatro, com os respectivos receptores, sendo um deles dedicado ao Hidrogênio e os outros três passíveis de operar nas frequências dos chamados Núcleos X. Uma característica importante nesta aplicação é a largura espectral desses receptores (*base band*), neste caso podendo ser escolhida em até cinco MHz. É significativamente maior que a comumente utilizada em experimentos de imagens, que é escolhida com um máximo de um MHz. Assim, alguns métodos com espectroscopia de sólidos ou mesmo ressonância quadrupolar poderão ser executados com esta configuração.

[125] Como não se utiliza comumente múltiplos receptores numa única frequência de operação, operando

sincronamente, não há necessidade do módulo de rotulação de dados, mas sua síntese pode ser mantida por não representar um volume de recursos muito significativo, e sua presença não altera o desempenho do sistema como um todo.

[126] Esta configuração permite inclusive o controle e monitoração da frequência de rotação da amostra em experimentos de *magical angle spinning* (MAS), onde o controle do rotor e o seu sincronismo com a sequência de pulsos é feita diretamente através de linhas de controle oriundas do próprio sequenciador ou controlador temporal (*Timing Sequencer*).

[127] Relaxômetro de RM: Outro exemplo de aplicação previsto na presente invenção é o Relaxômetro de RM, a forma mais simples de operação aqui proposta.

[128] Note-se que apenas um transmissor e um receptor são preservados, pois nesta forma de operação apenas uma espécie atômica é observada, normalmente o Hidrogênio. O módulo de roteamento de FI de referência não é absolutamente necessário, mas sua síntese não representa aumento significativo no uso de recursos da FPGA, portanto é mantido.

[129] Dos três exemplos ilustrados aqui, este é o de mais simples configuração. Destinado a realizar experimentos de caracterização de materiais através da medida dos seus parâmetros de relaxação, esta configuração normalmente compreende apenas um canal de transmissão e um de recepção, normalmente sintonizados na frequência de operação do núcleo de Hidrogênio para o campo magnético em que opera. Sua concepção não envolve normalmente um conjunto de canais de gradiente de campo magnético (X, Y e

Z), porém, tais dispositivos podem ser utilizados em experimentos simples de difusão de spins, e, portanto encontram-se representados nesta configuração com apenas um canal.

[130] Embora três exemplos tenham sido ilustrados, é necessário salientar que eles não são limitantes, e outras configurações são possíveis ao se utilizar os ensinamentos da invenção como, por exemplo, um sistema Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE) ou um Medidor de Campo Magnético (Gaussímetro) de alta resolução, entre outros.

[131] Embora a invenção tenha sido amplamente descrita, é óbvio para aqueles versados na técnica que várias alterações e modificações podem ser feitas sem que as referidas alterações não estejam cobertas pelo escopo da invenção.

REIVINDICAÇÕES

1. Espectrômetro para uso em sistemas de ressonância magnética, **CARACTERIZADO PELO FATO DE** compreender um *Field-Programmable Gate Array* configurado de modo a gerar e adquirir sinais de ressonância magnética, em que o *Field-Programmable Gate Array* é configurado de modo a compreender um carregador, um controlador temporal, um gerador de RF, um módulo de modulação de RF, e receptores síncronos em quadratura.

2. Espectrômetro, de acordo com a reivindicação 1, **CARACTERIZADO PELO FATO DE** que o módulo de modulação de RF é AM, FM e/ou PM.

3. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 ou 2, **CARACTERIZADO PELO FATO DE** compreender ainda um módulo de geração de formas de onda arbitrárias.

4. Espectrômetro, de acordo com a reivindicação 3, **CARACTERIZADO PELO FATO DE** o módulo de geração de formas de onda arbitrárias é configurado de modo a realizar a criação do campo de gradiente magnético (GR, GS, GP).

5. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 4, **CARACTERIZADO PELO FATO DE** compreender ainda um módulo de rotação para os geradores de forma de onda.

6. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 5, **CARACTERIZADO PELO FATO DE** compreender ainda um misturador de formas de onda.

7. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 6, **CARACTERIZADO PELO FATO DE**

compreender ainda um módulo de pré-ênfase para os geradores de forma de onda.

8. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 7, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender ainda um módulo de rotação para os geradores de forma de onda.

9. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 8, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender ainda um módulo de rotulagem e enfileiramento dos dados dos receptores.

10. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 9, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender ainda um módulo de priorização para os possíveis módulos de transferência.

11. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 10, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender ainda um módulo autônomo de transferência por USB.

12. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 11, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender ainda um módulo autônomo de transferência por Ethernet.

13. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 12, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender ainda um módulo autônomo de transferência por RS-232.

14. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 13, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender ainda um módulo de roteamento de FI de referência (FI Grid).

15. Espectrômetro, de acordo com qualquer uma das reivindicações de 1 a 14, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender ainda módulos auxiliares selecionados entre um grupo que compreende: controle de temperatura e monitoração da FPGA; correção de campo e homogeneidade, triggers de entradas e saídas; monitoração de sinais vitais; sincronismo respiratório; sincronização com rotor; controle e monitoração de uma cama de um paciente; multiplexador de condições de exceção de hardware.

16. Sistema de ressonância magnética, CARACTERIZADO PELO FATO DE compreender um espectrômetro, conforme definido nas reivindicações de 1 a 15.

17. Sistema de ressonância magnética, de acordo com a reivindicação de 16, CARACTERIZADO PELO FATO DE ser um scanner de IRM.

18. Sistema de ressonância magnética, de acordo com a reivindicação de 16, CARACTERIZADO PELO FATO DE ser um sistema de RM Analítico.

19. Sistema de ressonância magnética, de acordo com a reivindicação de 16, CARACTERIZADO PELO FATO DE ser um Relaxômetro de RM.

20. Sistema de ressonância magnética, de acordo com a reivindicação de 16, CARACTERIZADO PELO FATO DE ser um sistema Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE).

21. Sistema de ressonância magnética, de acordo com a reivindicação de 16, CARACTERIZADO PELO FATO DE ser um Medidor de Campo Magnético (Gaussímetro) de alta resolução.

RESUMO**ESPECTRÔMETRO PARA USO EM SISTEMAS DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA
E SISTEMA DE RESSONÂNCIA MAGNÉTICA**

A presente invenção se insere na área de engenharia elétrica, mais precisamente se referindo a um espectrômetro, geralmente utilizado em sistemas de ressonância magnética.

A presente invenção refere-se a um espectrômetro, para uso em sistemas de ressonância magnética que compreende um *Field-Programmable Gate Array* configurado de modo a gerar e adquirir sinais de ressonância magnética.

Em uma configuração preferencial do espectrômetro acima definido, o *Field-Programmable Gate Array* é configurado de modo a compreender um carregador, um controlador temporal, um gerador de RF, um módulo de modulação de RF, e receptores síncronos em quadratura.

Obviamente, tal espectrômetro conforme anteriormente definido pode ser utilizado em sistemas de ressonância magnética, como, por exemplo, um scanner de IRM, um sistema de RM Analítico e/ou um Relaxômetro de RM, além de um sistema de Ressonância Paramagnética Eletrônica e um Medidor de Campo Magnético (Gaussímetro) de alta resolução.

A presente invenção soluciona os problemas inerentes ao estado da técnica, ou seja, consegue proporcionar um sistema e método para uso em RM que apresenta: um caráter holístico, um sistema parametrizado, imunidade à obsolescência e escalabilidade.