

Simulações elétricas e eletromagnéticas de uma bobina de RF para imagens por ressonância magnética de hidrogênio e sódio de modelos animais em 7 T

Julio Henrique Ijano Stein
Centro de Engenharia Modelagem e
Ciências Sociais Aplicadas
Universidade Federal do ABC
São Bernardo do Campo, Brazil

Luiz Guilherme de Castro Santos
Centro de Engenharia Modelagem e
Ciências Sociais Aplicadas
Universidade Federal do ABC
São Bernardo do Campo, Brazil

Daniel Papoti
Centro de Engenharia Modelagem e
Ciências Sociais Aplicadas
Universidade Federal do ABC
São Bernardo do Campo, Brazil

Resumo—A fim de obter imagens por ressonância magnética (IRM) formadas por núcleos de hidrogênio e sódio em sistemas de 7 Tesla para estudos em modelos animais como ratos e camundongos, foi projetada uma bobina de dupla ressonância do tipo *4 ring birdcage* sintonizada nas frequências de ressonância de 78.9 MHz e 298 MHz utilizando simulações elétricas e eletromagnéticas. Toda simulação elétrica foi realizada utilizando o software *Advanced Design System* com parâmetros elétricos obtidos através da aplicação *Birdcage Builder*, e para o casamento de impedâncias a aplicação online *Smith Chart Tool* e o software *Optenni Lab*, e como resultado obtidos os parâmetros S_{21} e S_{11} . A simulação eletromagnética foi realizada no software *REMCOM XFDTD* e obtidos os parâmetros S_{11} e os mapas de distribuição de campo magnético B_1 para as duas frequências descritas acima. A análise dos mapas de campo magnético obtidos pelas simulações indica que a bobina é capaz de gerar um campo B_1 com alta homogeneidade no interior da bobina para as frequências de ressonância do hidrogênio e do sódio.

Palavras chave — Bobinas de RF, *4 ring birdcage*, Simulação por elementos finitos, MRI

I. INTRODUÇÃO

Sistemas de Imagem por Ressonância Magnética (IRM) com campos magnéticos estáticos (B_0) considerados ultra altos (i.e. ≥ 7 Tesla) permitem a aquisição de imagens com maior relação sinal/ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) [1] e conseqüentemente melhor resolução espacial, além de permitir a aquisição de imagens formadas por outros núcleos atômicos que possuem menor concentração corpórea e sensibilidade como Fósforo, Oxigênio, e Sódio [2]. Existe grande interesse pelos grupos de pesquisa no Brasil como a Faculdade de Medicina da USP (FMUSP) [3] e o CENABIO da UFRJ (que possuem sistemas de IRM pré-clínico de 7 T), na obtenção de imagens formadas por sódio em modelos animais, como ratos e camundongos, para o estudo de doenças como a obesidade [4].

Nesse contexto as bobinas de radiofrequência (RF) são componentes fundamentais para a excitação dos núcleos atômicos da amostra (bobinas transmissoras, Tx) e para a captação do sinal induzido durante os processos de relaxação nuclear (bobinas receptoras, Rx) [5]. Em geral, em sistemas de IRM com campo magnético ultra alto, a mesma bobina é utilizada como transmissora e receptora (chamada de bobina transceptora) a fim de minimizar artefatos de interferência dielétrica [6]. As bobinas devem estar sintonizadas na Frequência de Larmor (Equação 1) onde ω é a frequência de precessão do núcleo quando submetido ao campo estático B_0 , cuja constante de proporcionalidade é o fator giromagnético γ , sendo esta uma propriedade intrínseca de cada núcleo. Isso significa que para diferentes núcleos em diferentes valores de campo é necessário que a bobina de RF esteja sintonizada em uma frequência específica, sendo que em 7 T as bobinas

devem estar sintonizadas em 298.06 MHz e 78.89 MHz para os núcleos de hidrogênio e sódio respectivamente.

$$\omega_0 = \gamma \cdot B_0 \quad (1)$$

Enquanto a imagem formada por sódio traz informações funcionais de determinados metabólitos, também é preciso obter a imagem de hidrogênio com informações anatômicas. A utilização de duas bobinas sintonizadas nas diferentes frequências não é uma alternativa viável, dado que adquirir a primeira imagem e em seguida transferir a amostra de uma bobina para a outra causaria uma diferença de posição espacial da amostra na imagem, não permitindo a sobreposição das imagens. Portanto existe grande interesse e necessidade por centros de pesquisa especializados que sejam desenvolvidas bobinas de RF específicas sintonizadas em frequências de outros núcleos além do Hidrogênio (^1H) como o Sódio (^{23}Na), em geometrias que operem em dupla ressonância captando o sinal induzido dos dois núcleos.

No desenvolvimento de bobinas a realização de simulações com modelos matemáticos e físicos permite variar diversos parâmetros como as dimensões e os componentes utilizados, que seria inviável de realizar diversas vezes no laboratório devido à limitação de tempo e recursos. Portanto com o objetivo de projetar uma bobina de dupla ressonância para experimentos de IRM em ratos e camundongos em um *scanner* clínico de 7 T, foram realizadas simulações elétricas e eletromagnéticas de uma geometria de bobina do tipo *4 ring birdcage* a fim de observar seu comportamento eletromagnético e encontrar parâmetros geométricos e elétricos como um ponto de partida antes da prototipagem em bancada. As simulações permitem avaliar se a bobina está sintonizada nas frequências de ressonância desejadas e se o campo magnético é homogêneo no interior da bobina, condições necessárias para a obtenção das imagens.

A. Bobinas do tipo *Birdcage*

Dentre os diversos tipos de geometria de bobinas, a bobina do tipo *birdcage* possui formato cilíndrico aberto sendo composta por duas principais estruturas: *legs* e *end rings* (ER). Os *end rings* são estruturas circulares dispostas nas extremidades da bobina que são conectados pelos *legs* igualmente distribuídos. Entre essas estruturas são adicionados capacitores, transformando a bobina em um circuito ressonante do tipo LC com modos de ressonância, e quando excitada por um sinal na frequência de ressonância da bobina, uma corrente elétrica com distribuição senoidal percorre os *legs* gerando um campo magnético homogêneo chamado B_1 no interior da bobina, perpendicular ao campo estático B_0 . Diferentes configurações podem ser utilizadas: a configuração *high pass* (HP) possui capacitores apenas entre os ER, a *low pass* (LP) possui capacitores apenas entre os *legs* enquanto a configuração *band pass* (BP) possui em ambos.

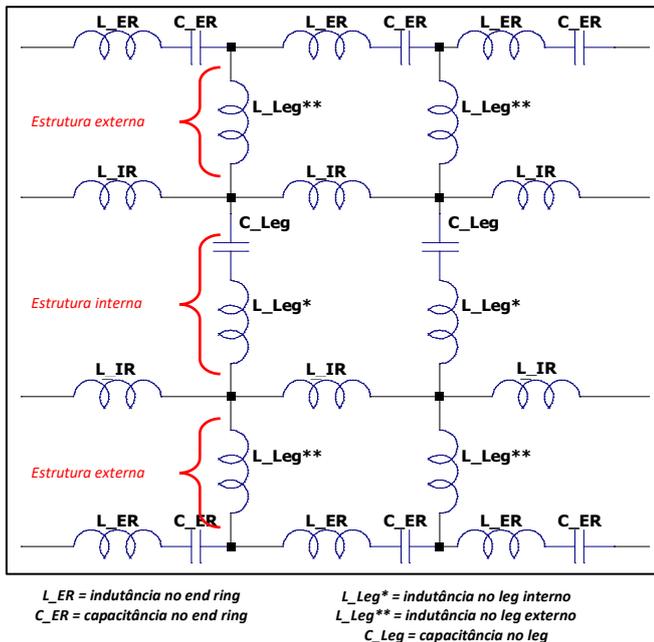


Fig. 1. Modelo para a bobina 4 ring birdcage. L_{Leg^*} e $L_{Leg^{**}}$ são as autoindutâncias para os trechos equivalentes do modelo.

Uma solução encontrada por Murphy-Boesch *et al* (1994) [7] para sintonizar a bobina *birdcage* em duas frequências foi a configuração nomeada de 4 ring birdcage, onde foram adicionados mais dois end rings no interior da bobina chamados de internal rings dividindo a bobina em 3 estruturas: uma estrutura interna e duas externas (Fig. 1). Ambas as estruturas podem ser construídas em configurações HP ou LP e suas combinações.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Definição da geometria

Foi escolhida a geometria do tipo gaiola (*Birdcage Coil*) [8] para a construção da bobina, por gerar um campo B_1 homogêneo e com boa relação sinal/ruído (SNR) [9]. A estrutura interna foi projetada em uma configuração LP dedicada à menor frequência de interesse: sódio em 78.9 MHz para um campo B_0 de 7 T, enquanto nas estruturas externas foi utilizada a configuração HP dedicada à maior frequência: hidrogênio de 298 MHz [7]. Porém antes da simulação da bobina de dupla ressonância foram realizadas duas simulações nas frequências individuais, sendo realizadas ao todo 3 tipos de simulações: uma bobina somente LP para o sódio, uma somente HP para o hidrogênio e por fim a bobina 4 ring para os dois núcleos. As dimensões da bobina foram escolhidas com base nas informações sobre os equipamentos de 7 T e as dimensões de um rato típico.

TABELA I. PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DA BOBINA

Tipo de Bobina	Diâmetro Interno (mm)	Diâmetro Externo (mm)	Comprimento dos Legs (mm)	Largura dos Legs e End Rings (mm)	Número de Legs
High Pass	72	119	100	6.4	16
Low Pass	68	119	100	6.4	16
4 ring	72	119	20/60/20	6.4	16

B. Componentes Elétricos

Para o cálculo de alguns componentes elétricos foi utilizado o aplicativo *Birdcage Builder* [9] onde foram inseridos os parâmetros geométricos da bobina e a frequência

de ressonância desejada e retornados os parâmetros elétricos: a autoindutância e indutância efetiva dos legs e end rings e a capacitância necessária para que a bobina entre ressonância na frequência de Larmor do núcleo de interesse. Além dos parâmetros geométricos, foi selecionado o tipo de condutor (seção transversal retangular) e a frequência de ressonância desejada. Este procedimento foi utilizado para os parâmetros das bobinas HP. Os valores de capacitância para a bobina LP em 78.8 MHz foram encontrados de forma empírica baseado nos valores para as frequências mais próximas disponíveis no aplicativo. Para a bobina 4 ring birdcage os valores de indutância foram estimados considerando os resultados da bobina high pass e de outra saída do aplicativo considerando o comprimento dos legs de 60 mm, e os valores iniciais de capacitância foram os mesmos obtidos para as bobinas separadas, e ajustados de forma empírica até serem obtidas as frequências de ressonância desejadas.

A fim de aproximar os modelos elétricos a bobinas reais, foram considerados dois tipos de resistência elétrica: a resistência da fita condutora [10], e a resistência presente nos capacitores utilizados para sintonia da bobina, que apresentam uma resistência em série equivalente (*ESR, equivalente series resistance*) fornecida no datasheet do fabricante do componente geralmente utilizado para a construção em bancada.

C. Simulação Elétrica

É possível modelar uma bobina birdcage utilizando um circuito equivalente (Fig. 1) onde os condutores são representados por indutores [11]: L_{er} e L_{leg} são respectivamente as indutâncias efetivas obtidas para os condutores nos end rings e nos legs, C representa o valor do capacitor obtido para a ressonância na frequência de Larmor no modo homogêneo da bobina, e as resistências podem ser adicionadas em série com os componentes. Para realizar a simulação elétrica foi utilizado o software *Advanced Design System (ADS, Agilent)* para modelar a bobina de acordo com os parâmetros elétricos obtidos e gerar os gráficos dos resultados dos coeficientes de transmissão e reflexão, assim como as cartas de *Smith*. A fim de obter os circuitos necessários para o casamento de impedâncias foram utilizados a ferramenta *Online Smith Chart Tool* [12] e o software *Optenni Lab (Optenni)*.

Para medir o coeficiente de transmissão (S_{21}) e assim observar os modos de ressonância das bobinas, um par de pick-up loops [13] foi simulado com impedância de 50 Ω e acoplado em dois indutores da bobina através de uma indutância mútua com constante de acoplamento k de 0.1. De forma empírica cada um foi acoplado em um indutor a 0° e 180° na mesma extremidade para o high pass e para o 4 ring birdcage, e a 0° e 180° na extremidade oposta para o low pass, garantindo assim que não ocorra interação entre os dois loops. Após a simulação o sinal obtido nas duas portas dos loops foi gerado um gráfico com o parâmetro S_{21} sendo possível observar os modos de ressonância e ajustar o valor dos capacitores até obter o modo na frequência desejada.

Após remover os loops e acoplar uma das portas a um capacitor da bobina, foi possível obter a curva do coeficiente de reflexão denominado de S_{11} . Essa porta possuía um terminal de 50 Ω , que juntos representavam o cabo coaxial que seria ligado na bobina em bancada para transmissão dos sinais. Foram acoplados para as bobinas high pass e low pass entre o capacitor de um end ring e de um leg respectivamente, e em ambos para a bobina 4 ring birdcage. O sinal observado na

frequência de interesse possuía baixa magnitude devido à impedância da bobina, portanto foi preciso transformar a impedância da bobina para a mesma impedância do cabo coaxial de 50Ω , processo chamado de casamento de impedâncias (*matching*).

Com o parâmetro S_{11} foi possível plotar a carta de Smith, onde a impedância com suas componentes real e imaginária foi plotada em função da frequência. Conhecendo a impedância da bobina na frequência desejada foi possível construir um circuito de *matching* que teve a função de transformar a impedância da bobina para a impedância desejada. Para os modelos *high pass* e *low pass* foi utilizada a ferramenta Online *Smith Chart Tool* para determinar o circuito de casamento de impedâncias, onde foram inseridas a frequência de interesse e a impedância desejada e após adicionar manualmente elementos elétricos como indutores e capacitores foi possível observar em tempo real o comportamento da impedância na carta de Smith. Após definidos os circuitos de *matching*, foram adicionados às portas e simulados novamente os parâmetros S_{11} para os dois modelos.

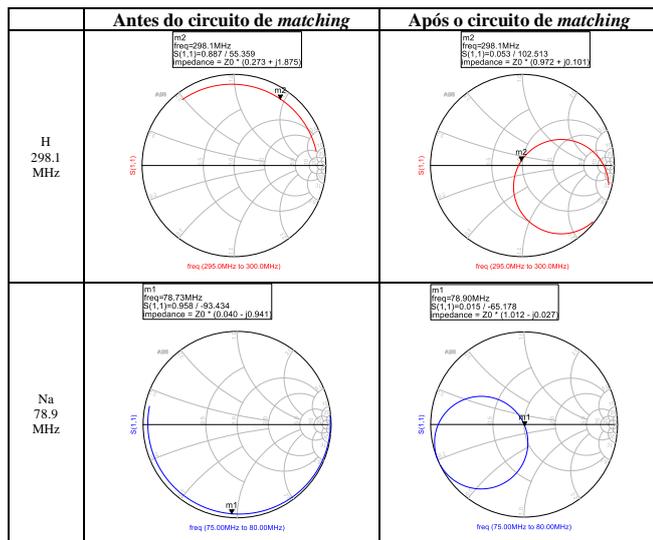


Fig. 2. Carta de Smith com marcadores nas frequências de interesse para os modelos *HP* e *LP*

O modelo *4 ring birdcage* possui duas portas, não sendo possível obter o circuito de *matching* com a mesma ferramenta. Portanto foi utilizado o software *Optenni Lab (Optenni)*, que permite a análise dos parâmetros S gerados no *ADS* e retorna o circuito de *matching* para os parâmetros desejados. Após obtido o circuito, este foi implementado nas duas portas e simulado novamente o parâmetro S_{11} .

D. Simulação Eletromagnética

Foram realizadas simulações eletromagnéticas para os três modelos de bobinas a fim de obter a distribuição o campo magnético de RF (chamado de campo B_1) no interior da bobina. Para isso foi utilizado o software *XFDTD (Remcom)* que utiliza o método do domínio do tempo com diferenças finitas (*Finite-difference time-domain method, FDTD*). O software conta com uma ferramenta de criar geometria do tipo *birdcage* nos tipos *high pass*, *low pass* e *band pass*, sendo necessário inserir os parâmetros geométricos: número de *legs* e seu comprimento, raio, largura dos *legs* e *end rings*; e os parâmetros elétricos: capacitância e resistência do capacitor. A indutância dos *legs* é considerada na própria simulação. A blindagem de RF foi adicionada manualmente, e para

construir o modelo *4 ring birdcage* foi criada uma bobina *band pass* e adicionados manualmente dois *end rings* adicionais (*internal rings*). Foi atribuído à blindagem de RF e à estrutura do *birdcage* como material condutor o cobre, e após definidas as condições de contorno e configurações de *Grid* e *Mesh* realizadas as simulações.

O resultado que permitia avaliar se a bobina estava sintonizada na frequência de interesse foi o parâmetro S_{11} , e após ajustes empíricos do valor dos capacitores foi possível sintonizar a bobina para a frequência de ressonância desejada. A bobina *4 ring birdcage* apresentou maior dificuldade para sintonia. Primeiramente os capacitores dos *end rings* foram removidos e sintonizada a região *low pass* para a frequência baixa, e então adicionados novamente os capacitores dos *end rings* e sintonizada para a frequência alta [13].

Após as bobinas sintonizadas nas frequências de interesse, foram adicionados sensores nos planos *ZX*, *ZY* e *XY* onde foi medido o campo magnético B_1 nas frequências desejadas e gerados mapas de campo quantitativos. Nesse momento a homogeneidade dos campos gerados foi avaliada qualitativamente, sendo ainda necessário o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise quantitativa.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Componentes elétricos

A tabela 2 apresenta os resultados obtidos no aplicativo *Birdcage Builder* e calculadas referente aos componentes elétricos utilizados nas simulações no *ADS*. Para todas as bobinas foi considerada a presença de uma blindagem de RF com o mesmo comprimento da bobina e diâmetro de 120 mm.

TABELA II. PARÂMETROS ELÉTRICOS OBTIDOS

Tipo de Bobina	Indutância Efetiva dos Legs (nH)	Indutância Efetiva dos End Rings (nH)	Resistência dos Legs (m Ω)	Resistência dos End Rings (m Ω)	Capacitância (pF)
High Pass	104.40	9.29	34.86	4.93	16.27
Low Pass	108.71	8.62	17,76	2,36	-

B. Simulação Elétrica

Os modelos de bobinas foram implementados no software *ADS* conforme os dados da tabela 2. A Fig. 2 apresenta as cartas de *Smith* obtidas antes e após a implementação dos circuitos de *matching* para as bobinas *HP* e *LP*, sendo possível observar que após o circuito de *matching* a impedância da bobina está no centro da carta de *Smith* (em 50Ω , casada com a impedância do cabo). Fig. 3 apresenta os gráficos com o coeficiente de transmissão (S_{21}) das bobinas simuladas, enquanto a Fig. 4 apresenta os resultados simulados obtidos para o coeficiente de reflexão (S_{11}) antes e depois da inserção do circuito de *matching*.

Na sintonia das bobinas de RF é preciso observar o coeficiente de transmissão S_{21} na escala em dB (Fig. 3). Quanto menor a atenuação maior é a transmissão do sinal de um loop para o outro, portanto os picos indicam em quais frequências há ressonância. Para o modo *HP* (Fig. 3.a) o penúltimo pico representa o modo de interesse, sendo que o último é um modo causado pelos *end rings*. Para o modelo *LP* (Fig. 3.b) o primeiro pico representa o modo de interesse, que produz campo homogêneo em no interior da bobina. No modelo *4 ring* (Fig. 3.d) há uma sobreposição de alguns modos, mas os modos de interesse que são o primeiro para a frequência baixa (sódio) e o penúltimo para a

frequência alta (hidrogênio) podem ser distinguidos claramente.

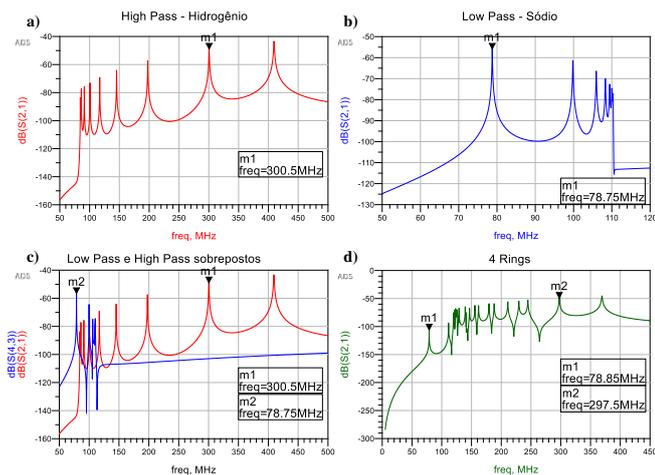


Fig. 3. Coeficientes de transmissão S_{21} para as bobinas simuladas: a) high pass b) low pass c) high pass e low pass sobrepostas d) 4 ring birdcage

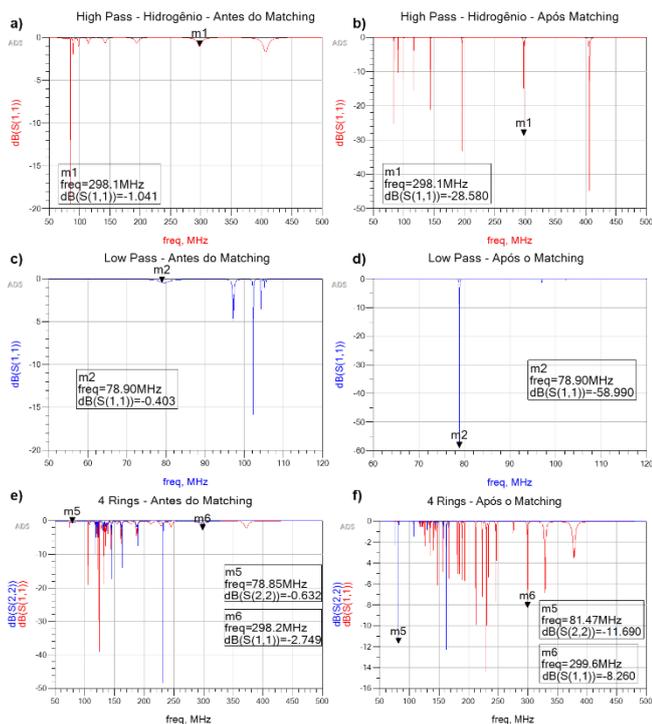


Fig. 4. Coeficientes de reflexão S_{11} para as bobinas simuladas: a) high pass antes do matching b) high pass após o matching c) low pass antes do matching d) low pass após o matching e) 4 ring antes do matching f) 4 ring após o matching

O coeficiente de reflexão S_{11} (Fig. 4) indica o sinal que é refletido, portanto após a implementação do circuito de matching é esperado que o ganho na frequência de interesse seja atenuado. No modelo HP o sinal em 300 MHz foi atenuado, porém o mesmo aconteceu com outras frequências, e no modelo LP apenas a frequência de interesse (78 MHz) foi atenuada. Para o modelo 4 ring birdcage os vales estão intensos e sobrepostos, mas é possível observar que as frequências de interesse foram atenuadas significativamente. No entanto, é improvável que o circuito de matching obtido seja o mesmo necessário para a bobina real pois sua impedância pode variar em função de muitos fatores como a não idealidade dos componentes, imperfeições na construção

e o ar presente no interior da bobina, já que as simulações consideram a bobina no vácuo.

C. Simulação Eletromagnética

Nas simulações eletromagnéticas a sintonia das bobinas foi realizada observando-se o gráfico do coeficiente de reflexão S_{11} sendo que há vales nas frequências dos modos de ressonância. A bobina somente high pass foi sintonizada com capacitores nos end rings de 16.27 pF para 298 MHz, enquanto a bobina somente low pass foi sintonizada com capacitores nos legs de 20 pF para 78 MHz. Já a bobina 4 ring birdcage foi sintonizada com capacitores nos legs de 29 pF e nos end rings de 25.5 pF. O gráfico da Fig. 5.a foi obtido pela porta 1, sendo que o penúltimo modo que está próximo de 2980 MHz indica a frequência de ressonância para a bobina HP, e o primeiro modo em aproximadamente 78 MHz do gráfico da Fig. 5.b obtido pela porta 2 indica a frequência de ressonância para a bobina LP.

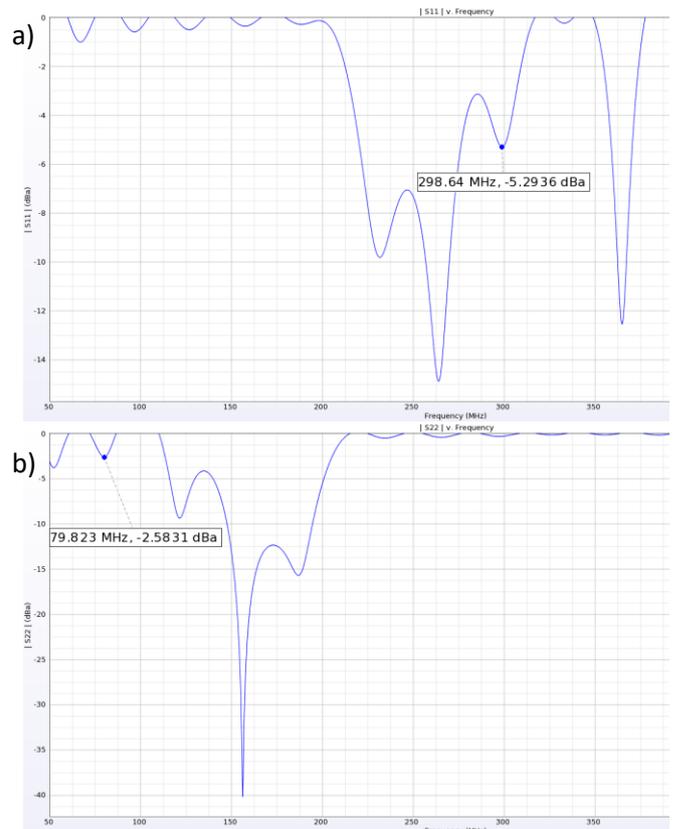


Fig. 5. Coeficientes de reflexão S_{11} para a bobina 4 ring birdcage através da porta 1 conectada a um end ring (a) e através da porta 2 conectada a um leg (b).

Uma das dificuldades das simulações realizadas foi aproximar o modelo elétrico da bobina ao modelo real, como por exemplo, na definição das indutâncias e resistências que são aproximações e podem possuir valores diferentes do que o real considerando fatores como a construção, imperfeições da fita de cobre, o próprio ar presente dentro da bobina e outros fatores que não foram considerados. As duas simulações realizadas possuem características diferentes e é esperado que os resultados dos parâmetros S também apresentam diferenças. Apesar disso as simulações são excelentes ferramentas para observar e compreender o comportamento das bobinas nas frequências de interesse,

além de permitirem rápida otimização antes da construção. Os diferentes valores de capacitores utilizados nas simulações podem ser observados na tabela 3.

TABELA III. VALORES DE CAPACITORES ENCONTRADOS PARA AS FREQUÊNCIAS DE INTERESSE EM DIFERENTES SOFTWARES

Tipo de Bobina	<i>Birdcage Builder</i>	ADS		REMCOM XFtd	
	C ER (pF)	C ER (pF)	C legs (pF)	C ER (pF)	C legs (pF)
High Pass	16.27	16.27	-	16.27	-
Low Pass	-	-	20.00	-	20.00
4 ring	-	19.50	25.00	25.50	29.00

O valor do capacitor do modelo *high pass* encontrado foi o mesmo para as duas simulações, mostrando assim que o aplicativo *Birdcage Builder* foi uma boa ferramenta para estimar valores iniciais de capacitância além de fornecer os valores de indutância para modelagem elétrica na *ADS*. O capacitor usado para o modelo *low pass* foi o mesmo para as simulações no *ADS* e no *REMCOM XFtd*, mostrando mais uma vez que a simulação para encontrar a frequência de ressonância nessas geometrias possui alta precisão.

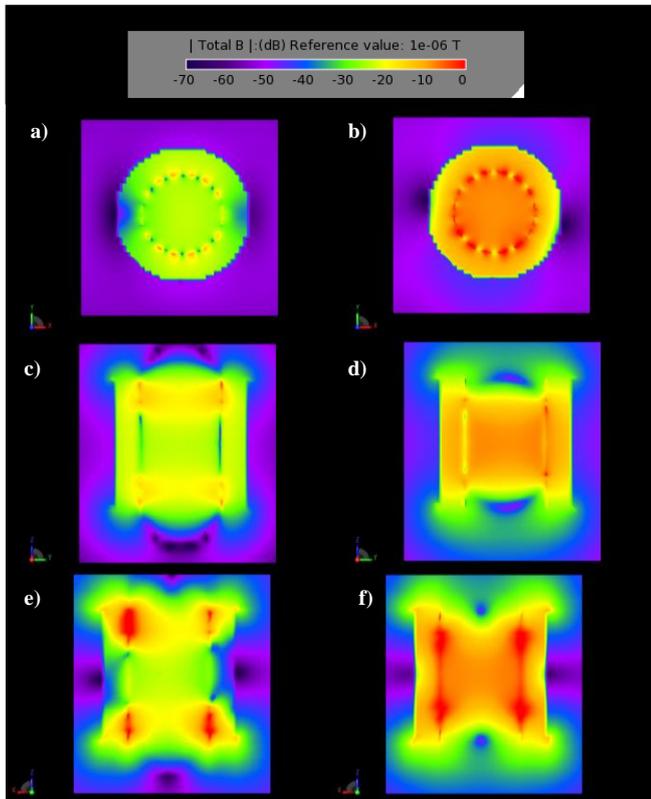


Fig. 6. Mapas de distribuição de campo B_1 para a bobina *4 ring birdcage* (em Magnitude) com cortes no centro da bobina na frequência de 298 MHz nos planos: a) ZX c) ZY e na frequência de 78 MHz nos planos: b) ZX d) ZY f) XY

Porém, o modelo *4 ring birdcage* apresentou diferença significativa entre as duas simulações, e isso pode ser explicado devido a maior limitação da simulação elétrica. Os valores das indutâncias do modelo elétrico influenciam diretamente a frequência de ressonância, e como não foi desenvolvido um método satisfatório para determinar essas indutâncias elas foram estimadas conforme alguns resultados do *Birdcage Builder* considerando um modelo *low pass* de

comprimento 60 cm para a estrutura interna e 40 cm para os *legs* externos.

Apesar de ser um método não acurado foi possível observar o comportamento da curva S_{21} neste modelo, onde os valores dos capacitores aumentam em relação às geometrias separadas. Esse aumento também ocorreu na simulação eletromagnética com o *REMCOM XFtd*, e como essas simulações se mostraram exatas em relação às realizadas no *ADS* com os valores conhecidos, é possível inferir que os resultados de capacitância utilizados no *REMCOM XFtd* estão mais confiáveis. Após a construção do protótipo será possível comparar de fato quais dos resultados estão mais próximos, e avaliar a exatidão das simulações nos diferentes modelos.

Os mapas de campo obtidos para os modelos *high pass* e *low pass* apresentaram alta homogeneidade de campo B_1 no centro da bobina, resultado fundamental para que a bobina excite toda a amostra de forma homogênea durante a transmissão. Fig. 6 apresenta a magnitude do campo magnético na bobina do tipo *4 ring birdcage*. O campo B_1 é homogêneo no seu centro observando o corte XY, mas observando os outros planos existem diferenças significativas do centro para as extremidades. Para a frequência do sódio o campo é homogêneo dentro dos *rings* internos e atenuado fora deles, resultado esperado uma vez que a estrutura interna foi projetada para a menor frequência. Na frequência do hidrogênio o campo é mais forte na região dos *end rings* e com menor intensidade na região central da bobina, já que as estruturas externas foram projetadas para esta frequência, e como consequência a região central da bobina observada nos planos ZY (Fig. 6.c) e XY (Fig. 6.e) possui menor intensidade de campo. Porém isso não é um problema na aquisição do sinal, dado que o sinal do hidrogênio é utilizado para localização espacial [14].

Os mapas de campo também adquiridos nas outras frequências indicam a inhomogeneidade em outros modos de ressonância, que não são úteis para a aquisição do sinal e formação das imagens. Observando os cortes XY no centro da bobina também é possível observar que a blindagem exerce papel fundamental na atenuação do campo para o exterior da bobina. Nas extremidades a atenuação é menor conforme pode ser observada nos planos ZX e ZY, sendo suficiente para reduzir o campo disperso fora da região de interesse onde a amostra está localizada. Para aumentar a atenuação nessas regiões poderia ser aumentado o comprimento da blindagem, que nas simulações possuía o mesmo comprimento total da bobina.

IV. CONCLUSÃO

As metodologias utilizadas apesar de limitadas levaram a resultados semelhantes nos modelos de *birdcage high pass* e *low pass*, indicando que ambas as simulações são precisas para determinar a frequência de ressonância das bobinas. A bobina *4 ring birdcage* por ser uma geometria mais complexa necessita de um maior refinamento em sua metodologia para se aproximar ainda mais do modelo real para a simulação elétrica, mas apresentou resultados promissores que podem ser considerados úteis para sintonizar a bobina em bancada. Os mapas de campo obtidos nas frequências desejadas estão de acordo com o reportado na literatura [14]. Além disso, o processo de otimização computacional através das simulações elétrica e eletromagnética auxiliam na compreensão do funcionamento das bobinas. A comparação dos parâmetros S, juntamente com os mapas de campo B_1 com outras

frequências também são indicativos de que as bobinas estão sintonizadas nas frequências de ressonância para os spins nucleares de interesse.

V. PERSPECTIVAS FUTURAS

Os próximos passos são a construção real de um protótipo da bobina *4 ring birdcage* e sintonia em bancada utilizando um analisador de redes vetorial, possibilitando a comparação entre os resultados obtidos dos componentes utilizados e dos parâmetros S, assim como medidas dos mapas de campo B_1 adquiridos experimentalmente no *scanner* de 7 T com a utilização de *phantoms* apropriados. Após sintonizada em bancada e implementado o circuito de *matching* serão realizados testes no magneto com a obtenção de imagens de *phantoms* para a validação real da bobina. É possível ainda a alimentação em regime de excitação e detecção em quadratura, o que implicaria, em teoria em um ganho de 50% em eficiência na transmissão de potência e de 40% em SNR.

VI. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao grupo de pesquisa MRI UFABC: Professor Daniel Papoti, Luiz Santos e Marina Vidotto.

REFERENCES

- [1] D. B. Plewes and W. Kucharczyk, "Physics of MRI: A primer," *J. Magn. Reson. Imaging*, vol. 35, no. 5, pp. 1038–1054, 2012, doi: 10.1002/jmri.23642.
- [2] S. Francis, C. E. Buchanan, B. Prestwich, and M. W. Taal, "Sodium MRI: A new frontier in imaging in nephrology," *Curr. Opin. Nephrol. Hypertens.*, vol. 26, no. 6, pp. 435–441, 2017, doi: 10.1097/MNH.0000000000000370.
- [3] F. Marques, "A morte explica a vida," *Pesqui. FAPESP*, vol. 229, pp. 14–21, 2015, doi: 10.12957/polemica.2010.2785.
- [4] M. Rönn *et al.*, "Quantification of total and visceral adipose tissue in fructose-fed rats using water-fat separated single echo MRI," *Obesity*, vol. 21, no. 9, pp. 388–395, 2013, doi: 10.1002/oby.20229.
- [5] A. Webb, "Radiofrequency coils," *New Dev. NMR*, vol. 2016-Janua, no. 7, pp. 81–165, 2016, doi: 10.1039/9781782623878-00081.
- [6] C. M. Collins, W. Liu, W. Schreiber, Q. X. Yang, and M. B. Smith, "Central brightening due to constructive interference with, without, and despite dielectric resonance," *J. Magn. Reson. Imaging*, vol. 21, no. 2, pp. 192–196, 2005, doi: 10.1002/jmri.20245.
- [7] J. Murphy-Boesch, R. Srinivasan, L. Carvajal, and T. R. Brown, "Two Configurations of the Four-Ring Birdcage Coil for 1H Imaging and 1H-Decoupled 31P Spectroscopy of the Human Head," *J. Magn. Reson. Ser. B*, vol. 103, no. 2, pp. 103–114, 1994, doi: 10.1006/jmrb.1994.1017.
- [8] C. E. Hayes, W. A. Edelstein, J. F. Schenck, O. M. Mueller, and M. Eash, "An efficient, highly homogeneous radiofrequency coil for whole-body NMR imaging at 1.5 T," *J. Magn. Reson.*, vol. 63, no. 3, pp. 622–628, Jul. 1985, doi: 10.1016/0022-2364(85)90257-4.
- [9] C. L. Chin, C. M. Collins, S. Li, B. J. Dardzinski, and M. B. Smith, "BirdcageBuilder: Design of specified-geometry birdcage coils with desired current pattern and resonant frequency," *Concepts Magn. Reson. Part B Magn. Reson. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 156–163, 2002, doi: 10.1002/cm.10030.
- [10] G. Giovannetti, "Birdcage Coils: Equivalent Capacitance and Equivalent Inductance," *Wiley Online Libr.*, 2014.
- [11] J. Jin, *Electromagnetic Analysis and Design Jianming Jin.pdf*, 1st ed. Urbana, Illinois: CRC Press, 1999.
- [12] W. Kelsey, "Online Smith Chart Tool." will-kelsey.com/smith_chart (accessed Apr. 15, 2020).
- [13] J. T. Vaughan and J. R. Griffiths, "RF Coils for MRI: RF Safety," in *Wiley*, 2012, pp. 407–436.
- [14] J. Mispelter, M. Lupu, and A. Briguet, *NMR Probeheads for Biophysical and Biomedical Experiments*. PUBLISHED BY IMPERIAL COLLEGE PRESS AND DISTRIBUTED BY WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO., 2006.