

Fid, eco, $\pi/2$, fase e quadratura, spin locking, Hartmann-Hahn, NOE, CRAMPS, MLEV-64, WALTZ-16, WAHUHA, COSY, NOESY, DEPT, INEPT,... Todos estes termos e outras dezenas são largamente utilizados por usuários de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e estão associados a um fator comum: a radiofrequência (RF).

Ao escrevermos e prepararmos este conjunto de apostilas e práticas sobre Instrumentação Básica para RMN, não tivemos como intenção a originalidade, mas sim apresentar de forma introdutória, simplificada e sucinta, um assunto que representa toda a base de funcionamento de um espectrômetro: o sistema de RF.

Algumas vezes chegamos a omitir detalhes de modo a evitar tornar o assunto em estudo ainda mais complexo. Tais informações poderão ser apresentadas no decorrer do curso, caso se tornarem necessárias.

A bibliografia indicada no final de cada apostila não foi apenas consultada, alguns trechos foram praticamente copiados e outros simplesmente adaptados.

*Tito J. Bonagamba
Edson L. G. Vidoto
Paulo R. O. Lasso
Eduardo G. da Silva
João G. da Silva*

Laboratório de Espectroscopia de Alta Resolução - RMN

O que é dB?

Em qualquer manual ou catálogo de um espectrômetro de RMN você se defrontará com uma grandeza denominada decibel (dB). Seja para o ganho do amplificador de desacoplamento, para o nível de ruído introduzido pelo amplificador de sinal (figura de ruído), para o nível de atenuação dos filtros para as frequências indesejáveis, etc.

O dB é basicamente uma medida relativa de potência elétrica e é definido por

$$\text{potência relativa} = \text{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (\text{Eq. 1}),$$

onde se quer caracterizar a potência P com relação a uma potência conhecida P_0 . Então, por exemplo, se $P=P_0$, a potência relativa será 0 dB e, se $P=100P_0$, a potência relativa será 20dB.

Para um caso real, suponha que um gerador de pulsos de RF os produza com uma potência de $P_0=0.1\text{W}$ e a potência necessária para que possamos aplicar um pulso de 90° sobre os spins nucleares no interior da bobina de excitação seja de $P=1\text{KW}$. Neste caso, deveríamos utilizar um amplificador de potência que pudesse amplificar 10.000 vezes o pulso de RF gerado pelo transmissor. Outra forma de definir o ganho do amplificador de potência ($\text{ganho}=P/P_0$) seria em termos da quantidade de decibéis

$$\text{potência relativa} = \text{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1000\text{W}}{0.1\text{W}} \right) = 40 \text{ dB} \quad (\text{Eq. 2})$$

Podemos também expressar as tensões relativas em decibéis, lembrando que, para uma dada impedância fixa R , a potência e a tensão elétrica se relacionam na forma $P = V^2/R$. Então, podemos também expressar a voltagens relativas em dB's como

$$\begin{aligned} \text{tensão relativa} = \text{dB} &= 10 \log_{10} \left(\frac{V^2/R}{V_0^2/R} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{V^2}{V_0^2} \right) = \\ &= 10 \log_{10} \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right] = 20 \log_{10} \left(\frac{V}{V_0} \right) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\begin{aligned} P = P_0 &\rightarrow \text{dB} = 0 \text{ dB} \\ P = 100P_0 &\rightarrow \text{dB} = 20 \text{ dB} \end{aligned}$$

- 1 -

$$\begin{aligned} \text{Potência relativa} &= 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_0} \right) \\ \text{Tensão relativa} &= 20 \log_{10} \left(\frac{V}{V_0} \right) \end{aligned}$$

Então, para um ganho de $V/V_0=100$, o ganho de voltagem é de 40dB.

O que é dBm?

dBm é uma razão de potência como já discutido anteriormente, porém, comparando-se P com uma potência fixa $P_0=1\text{mW}$. Desta forma, a medida em dBm resulta em valores absolutos da potência P. Então, se um sintetizador gera um sinal de RF de 10mW, podemos dizer também que ele gera um sinal de 10dBm já que

$$10\log_{10}\left(\frac{P}{P_0}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{10\text{mW}}{1\text{mW}}\right) = 10 \text{ dBm} \quad (\text{Eq. 4})$$

Usualmente, estamos interessados em saber o valor da tensão ao invés da potência elétrica. Isto é facilmente calculado utilizando-se a relação $P=V^2/R$. Considerando um sistema de impedância característica $R=50\Omega$, teremos: 0dBm=0.225V, 7dBm=0.5V, 13dBm=1.0V, etc.

O que é figura de ruído?

Outro exemplo de medida relativa é a figura de ruído ("noise figure", NF) de um amplificador de sinal de RMN (ou de qualquer outro elemento ativo). A NF é definida em termos do nível de tensão elétrica do ruído do sinal de RMN antes do amplificador de sinal, N_S , e o nível de tensão elétrica de ruído gerado pelo amplificador, N_A

$$\text{NF (dB)} = 10\log_{10}\left[\frac{(N_A^2 + N_S^2)}{N_S^2}\right] \quad (\text{Eq. 5})$$

Um bom amplificador de sinal para aplicações em RMN deve apresentar uma "noise figure" menor que 1.5 dB. Considerando $\text{NF}=1.5\text{dB}$, a nível de ruído na saída do amplificador sofre um acréscimo de 41.25%, visto que

$$1.5 \text{ dB (NF)} = 10 \log_{10}\left[\frac{(N_A^2 + N_S^2)}{N_S^2}\right] \Rightarrow$$

$$\log_{10}\left[\frac{(N_A^2 + N_S^2)}{N_S^2}\right] = 0.15 \Rightarrow$$

$$\frac{(N_A^2 + N_S^2)}{N_S^2} = 10^{0.15} = 1.4125 \quad (\text{Eq. 6})$$

Autores: Tito J. Bonagamba e Edson L. G. Vidoto (06/94).

Revisão: Eduardo G. da Silva (06/94).

Bibliografia:

1. Fukushima, E., Roeder, S.B.W., Experimental Pulse NMR: a nuts and bolts approach, Addison-Wesley Publishing Company, EUA, 1981.

Laboratório de Espectroscopia de Alta Resolução - RMN

Módulos Básicos de Radiofrequência

Objetivos:

Apresentar o princípio de funcionamento dos seguintes módulos básicos de radiofrequência: sintetizadores, cabos coaxiais e “chips de RF”.

1.Introdução

Para realizarmos experimentos de RMN de dupla ressonância e múltiplos pulsos devemos possuir equipamentos que nos permitam controlar totalmente os pulsos de radiofrequência (RF) (transmissão de RF) e os sinais de RMN (recepção dos fids e ecos). Desta forma, necessitamos conhecer o funcionamento básico de vários componentes elétricos ou eletrônicos de RF.

Apresentaremos nesta apostila: sintetizadores de RF, cabos coaxiais, chaveadores, divisores de potência $[(0^0,0^0), (0^0,90^0), (0^0,180^0)]$, misturadores, amplificadores e atenuadores.

2.Sintetizadores

O sinal de radiofrequência, simbolizado por RF, nada mais é que uma tensão alternada de frequência situada na faixa de unidades de MHz até centenas de MHz, produzida por geradores de corrente alternada denominados sintetizadores de RF. Os sintetizadores de RF utilizados nos espectrômetros de RMN produzem tensão alternada, de forma contínua no tempo, com grande precisão em sua amplitude (de baixo nível, ~1volt) e frequência. Por convenção, a resistência interna (ou impedância de saída) destas fontes de tensão são padronizadas em 50Ω , e esta convenção se estende aos demais componentes de RF do espectrômetro.

3.Cabos coaxiais

Os cabos coaxiais são linhas de transmissão que transportam a RF de um ponto a outro do espectrômetro de RMN. Ele é constituído por dois fios condutores separados por um material isolante, normalmente na configuração esquematizada na Fig. 1.

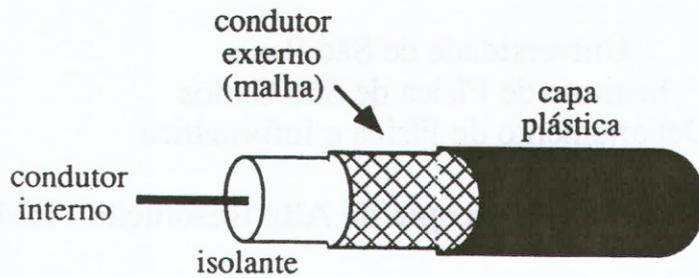


Fig. 1: Cabo coaxial.

O fio condutor situado na região externa do cabo coaxial e confeccionado na forma de uma malha é geralmente ligado ao terra do circuito de RF e serve de blindagem para o fio condutor elétrico interno, o qual conduz os sinais de RF (pulsos de RF ou sinais de RMN). Estas linhas de transmissão são construídas de tal forma que elas apresentam sempre uma impedância característica constante Z_0 ; em nosso caso particular $Z_0 = 50\Omega$.

Além disso, eles apresentam uma função particular extremamente utilizada em RMN quando seu comprimento corresponde a um quarto do comprimento de onda ($\lambda/4$) de uma RF de frequência ($v=c/\lambda$, onde c é a velocidade de propagação da RF no cabo coaxial). Nesta circunstância, o cabo coaxial se comporta como um transformador de impedâncias, obedecendo a relação $Z_0^2 = Z_{in} * Z_{out}$, onde Z_{in} representa a impedância de entrada e Z_{out} representa a impedância de saída do cabo coaxial. Particularmente, quando $Z_{in} \approx 0$ teremos $Z_{out} \rightarrow \infty$ e vice-versa, considerando que geralmente $Z_0 = 50\Omega$.

A utilização em conjunto de cabos coaxiais e diodos cruzados fornecerão aplicações importantes na confecção de um espectrômetro.

4. Componentes úteis de RF

4.1 Misturador Duplamente Balanceado (Double Balanced Mixer - DBM)

O DBM é um "chip" de RF para aplicações em alta frequência. Ele é normalmente um elemento passivo de três portas denominadas: RF, LO e IF, Fig. 2.

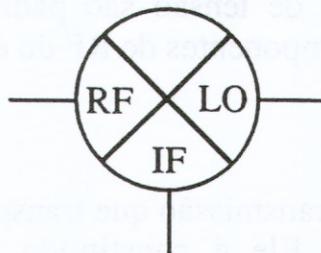


Fig. 2: Misturador duplamente balanceado (DBM).

Quaisquer duas portas podem ser utilizadas como entrada de sinal e qualquer uma como saída, dependendo da aplicação desejada. Ele é extremamente útil em uma grande variedade de aplicações, as quais descrevemos a seguir.

4.1.1. Misturador ("mixer")

O misturador ("mixer") é basicamente um multiplicador analógico de sinais. Ele é utilizado para se obter a soma e a subtração de frequências de diferentes sinais de RF (senoidais), Fig. 3.

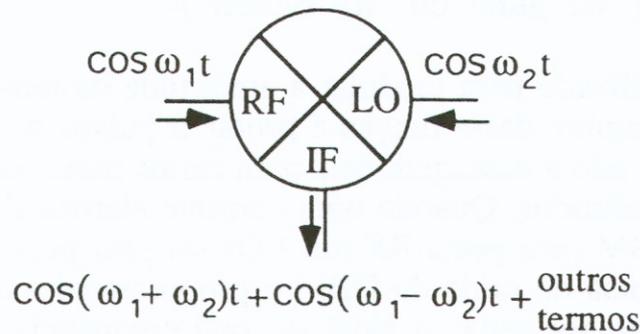


Fig. 3: DBM utilizado como misturador.

4.1.2. Dobrador de frequências

Quando sinais de RF de mesma frequência e fase são aplicados a duas portas quaisquer, o sinal obtido na terceira porta apresentará o dobro da frequência dos sinais de entrada (dobrador de frequência), Fig. 4.

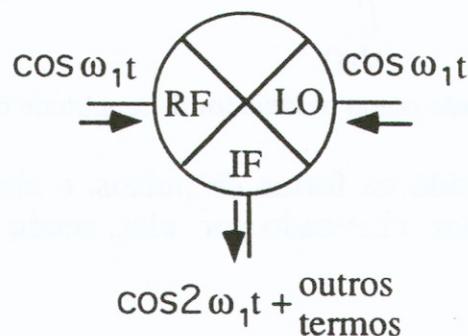


Fig. 4: DBM utilizado como dobrador de frequências.

4.1.3. Detector sensível a fase ("phase sensitive detector")

Quando dois sinais de RF de mesma frequência são aplicados nas portas LO e RF, uma tensão constante é estabelecida na porta IF, cuja amplitude varia com o cosseno da diferença de fase entre as duas fontes, Fig. 5.

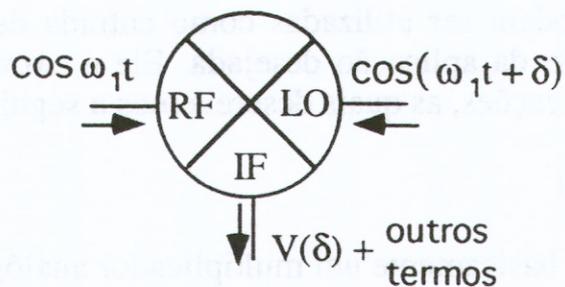


Fig. 5: DBM utilizado como detector sensível à fase (δ).

4.1.4. Modulador de RF ("RF gate" ou "RF switch")

Um DBM pode ser utilizado para modular a amplitude da radiofrequência. Em RMN, a aplicação mais comum desta função é produzir pulsos de radiofrequência, onde podemos permitir ou não a passagem dela para certos ramos do espectrômetro, em intervalos de tempo definidos. Quando uma corrente elétrica flui pela porta IF, um sinal que entra no DBM pela porta RF (ou LO) sai pela porta LO (ou RF). A amplitude da radiofrequência de saída do DBM é proporcional à corrente aplicada na porta IF. Se a corrente for nula, o sinal de radiofrequência de entrada será atenuado na saída na ordem de 30dB, Fig. 6.

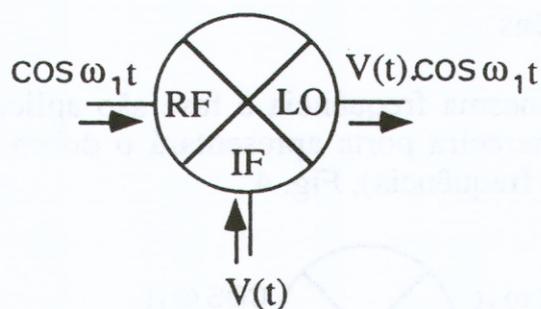


Fig. 6: DBM utilizado como modulador de amplitude da RF.

Caso o sinal $V(t)$ seja fornecido na forma de pulsos, o sinal produzido por um gerador de onda contínua pode ser chaveado por eles, sendo transformado em um sinal de RF pulsado.

4.1.5. Inversor de fase

Outra aplicação para o comportamento particular do DBM descrito no item 4.1.4, é utilizá-lo como um inversor de fase de RF ($0^0, 180^0$). Isto é feito aplicando-se na porta IF correntes de sentidos contrários e de mesma amplitude, de modo a manter a fase do sinal de saída igual à fase do sinal de entrada ou 180^0 defasado, Fig. 7.

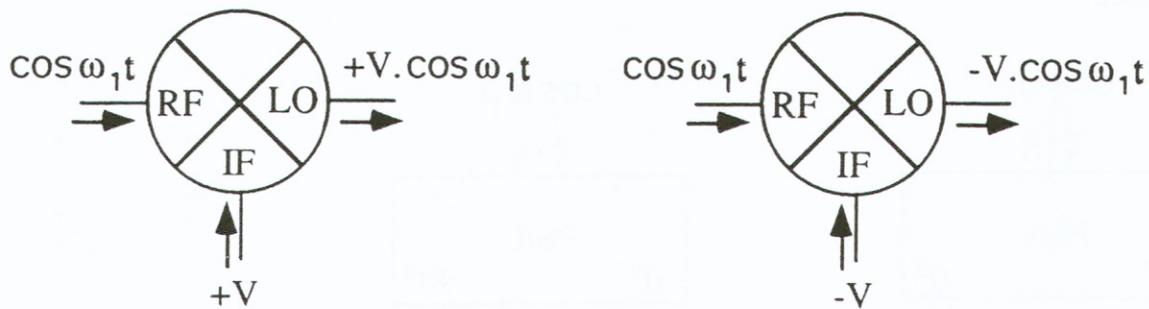


Fig. 7: DBM utilizado como inversor de fase de um sinal de RF.

4.2. Divisor/Combinador de Potência ("power splitter/combiner", PS/C)

O PS/C é um "chip" de RF que apresenta $n+1$ portas, cuja função é combinar n sinais em apenas uma porta ou dividir um sinal para n portas.

4.2.1. Divisor de Potência ("power splitter")

Um divisor de potência é um "chip" que permite que um sinal de entrada de RF seja dividido em vários sinais de saída de RF. Todos estes sinais de saída apresentam a mesma intensidade, as quais logicamente dependem da intensidade do sinal de entrada, e são altamente isolados entre si (~ 30 dB). Em geral, eles consistem de uma porta de entrada denominada S e n ($= 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 24$ e 48) portas de saída denominadas P_n , Fig. 8.

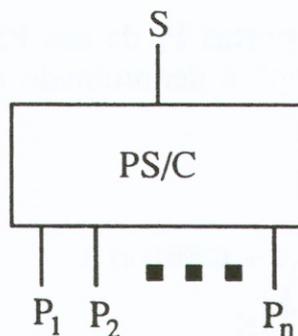


Fig. 8: Divisor/Combinador de potência (PS/C).

Considerando apenas os divisores de duas saídas, podemos encontrá-los com as seguintes diferenças de fases entre o sinal de entrada e os de saída: $(0^0, 0^0)$, $(0^0, 90^0)$ e $(0^0, 180^0)$, Fig. 9.

Os "splitters" de $(0^0, 0^0)$ e $(0^0, 180^0)$ são, em geral, de funcionamento para faixas muito amplas de frequência, enquanto que o de $(0^0, 90^0)$ trabalham em bandas de RF muito estreitas. Os demais apresentam apenas versões com todas saídas em fase

com a entrada.

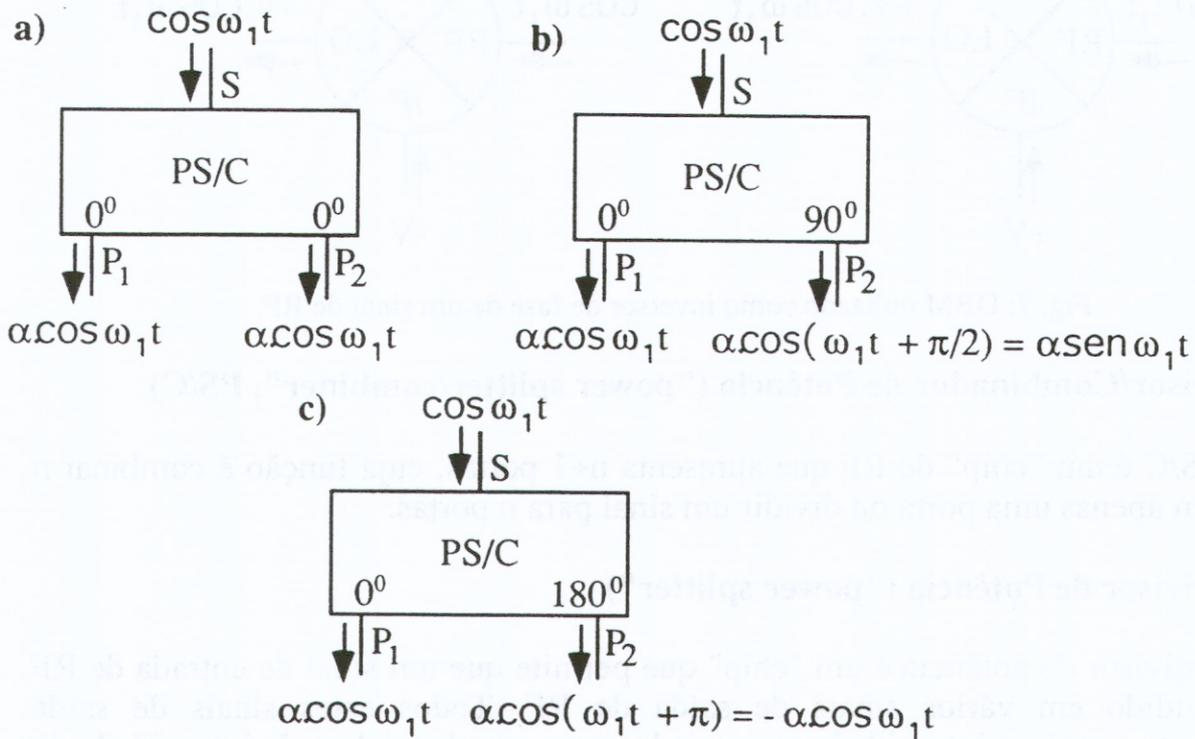


Fig. 9: Divisores de potência: a) $(0^\circ, 0^\circ)$, b) $(0^\circ, 90^\circ)$ e c) $(0^\circ, 180^\circ)$.

4.2.2. Combinador de Potência ("power combiner")

Se sinais de RF são inseridos nas portas P_n de um PS/C, a porta S fornecerá a soma dos mesmos. Neste caso, o "chip" é denominado combinador ("combiner"), Fig. 10.

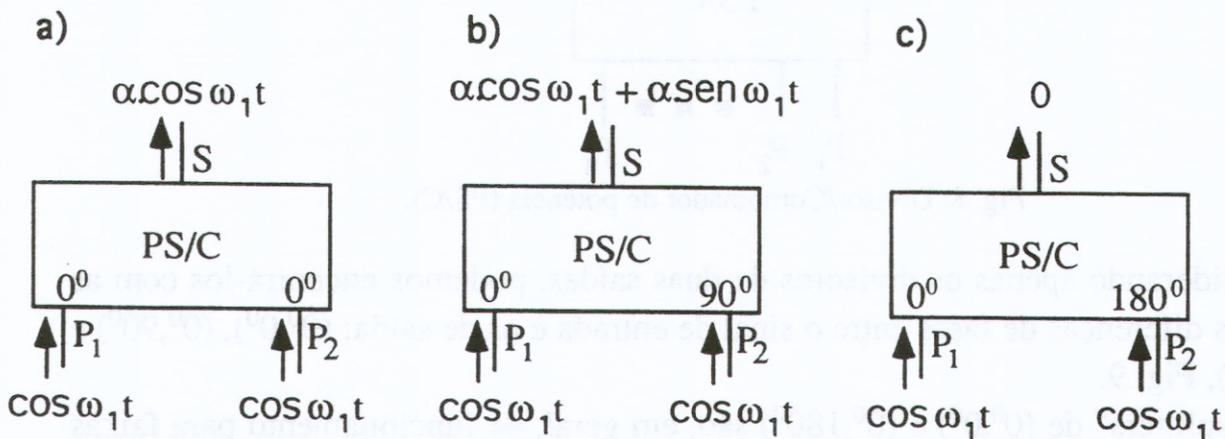


Fig. 10: Combinadores de sinais de RF simultâneos.

Geralmente, em aplicações para RMN, os sinais de RF não são inseridos simultaneamente nas portas P_n , permitindo a combinação de n sinais em apenas um canal (S), Fig. 11.

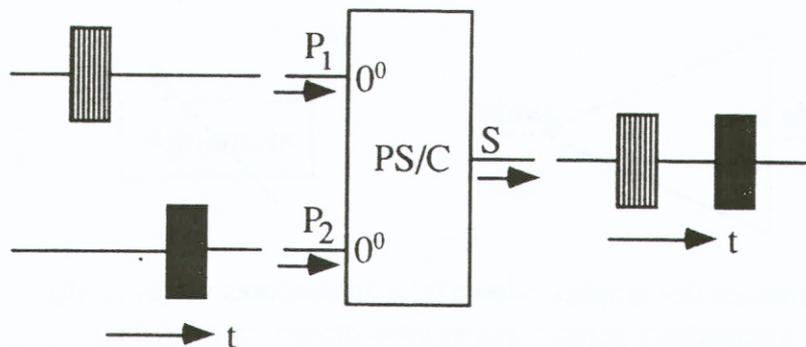


Fig. 11: Combinador de sinais de RF não simultâneos.

4.2.3. "Monitor de impedância"

Uma terceira característica importante do PS/C ($0^0, 0^0$) é que existe uma isolação entre as portas 1 e 2, a qual dependerá da impedância presente na porta S. Caso esta impedância seja igual a 50Ω , a isolação será máxima ($\sim 30\text{dB}$ com relação ao sinal de entrada). Deste modo, podemos determinar se impedância na porta S é igual ou não a 50Ω injetando um sinal de RF em uma de suas portas e observando sua intensidade na outra porta, Fig. 12.

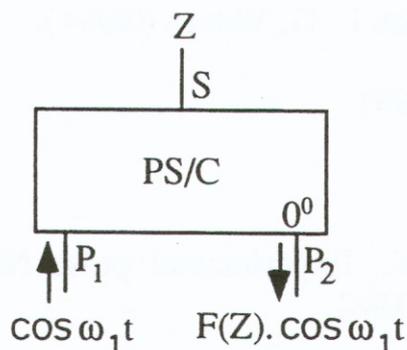


Fig. 12: PS/C utilizado como monitor de impedância.

Como veremos na prática sobre sondas de RMN, esta aplicação do PS/C será de grande importância no procedimento de "sintonia" das mesmas.

5. Amplificadores e atenuadores de RF

Os amplificadores e atenuadores, Fig. 13, participam do circuito de RF adequando os níveis de potência dos sinais aos equipamentos que são destinados (sonda e receptor).

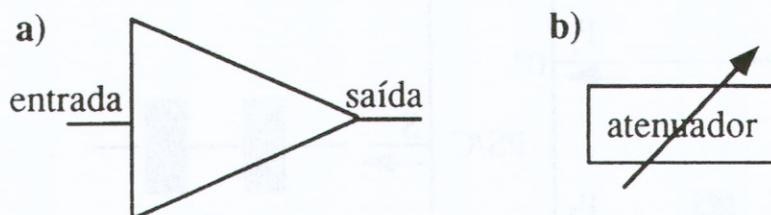


Fig. 13: Símbolos dos amplificadores (a) e atenuadores variáveis (b) (caso os atenuadores sejam fixos as setas devem ser retiradas).

No caso da detecção do sinal de RMN, onde os sinais são extremamente pequenos, necessitamos amplificá-los de tal forma a não introduzir ruídos adicionais (baixa figura de ruído) e com ganho suficiente para que possamos manipulá-los com outros elementos do circuito de RF. Os amplificadores utilizados para este fim são denominados amplificadores de sinal.

Para o correto ajuste dos pulsos de RF de β graus, necessitamos amplificar o sinal de RF até algumas dezenas de Watts. Isto é realizado através de amplificadores de potência. Todavia, estes amplificadores em sua maioria possuem um ganho fixo, e o ajuste de potência da RF deve ser feita antes da amplificação, através de atenuadores que controlam a amplitude do sinal em baixo nível.

Autores: Tito J. Bonagamba e Edson L. G. Vidoto (06/94).

Revisão: Eduardo G. da Silva (06/94).

Bibilografia:

1. Fukushima, E., Roeder, S.B.W., Experimental pulse NMR: a nuts and bolts approach, USA, Addison-Wesley, 1981.
2. RF/IF Designer's Handbook, USA, Minicircuits, 1993.

Prática: Módulos Básicos de Radiofrequência

I. Familiarização com os geradores de RF

(a) Utilizando um osciloscópio, verifique como funcionam os geradores da Tektronix e Minipa.

II. Cabos coaxiais

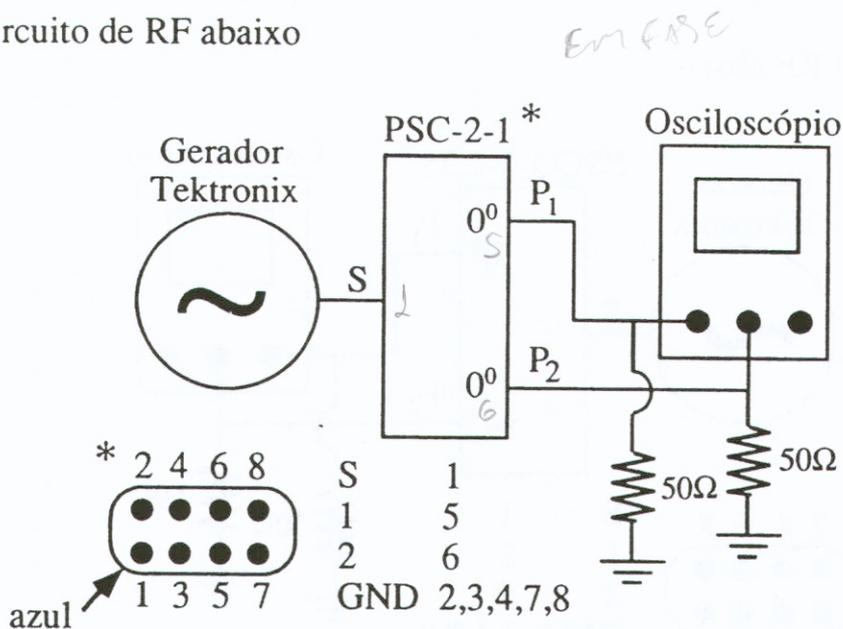
(a) Visite a bancada de demonstrações.



III. Divisor/combinador de potência

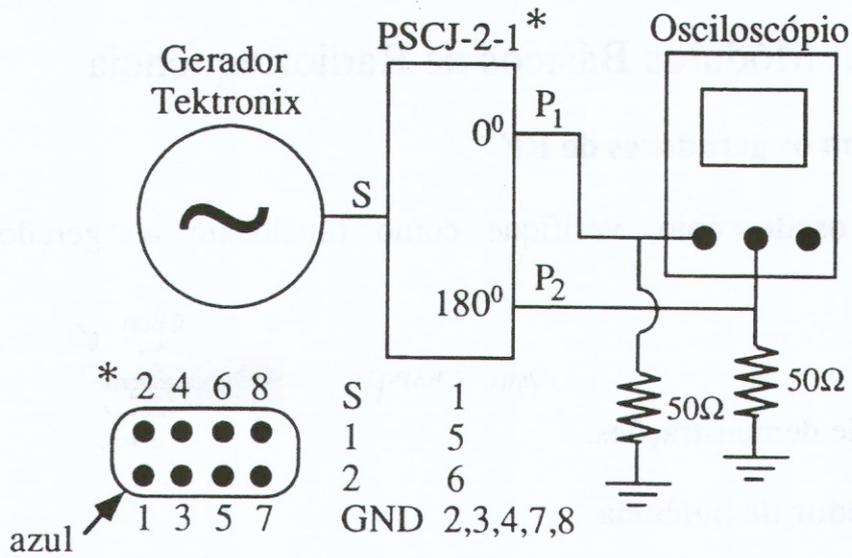
III.a. Divisores de potência

(a) Monte o circuito de RF abaixo



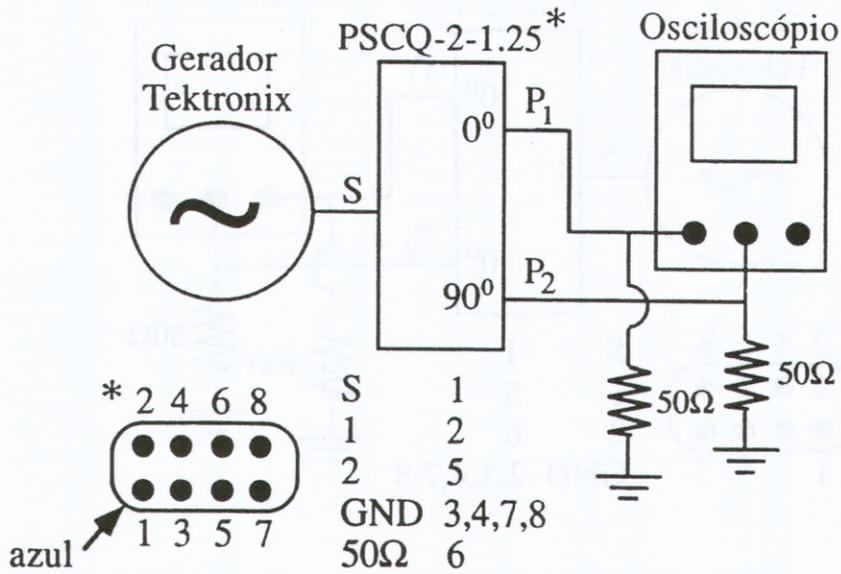
(b) Analise as duas saídas do divisor através do osciloscópio;

(c) Monte o circuito de RF abaixo



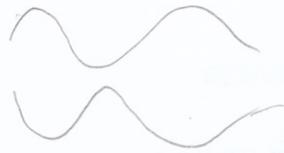
(d) Analise as duas saídas do divisor através do osciloscópio;

(e) Monte o circuito de RF abaixo

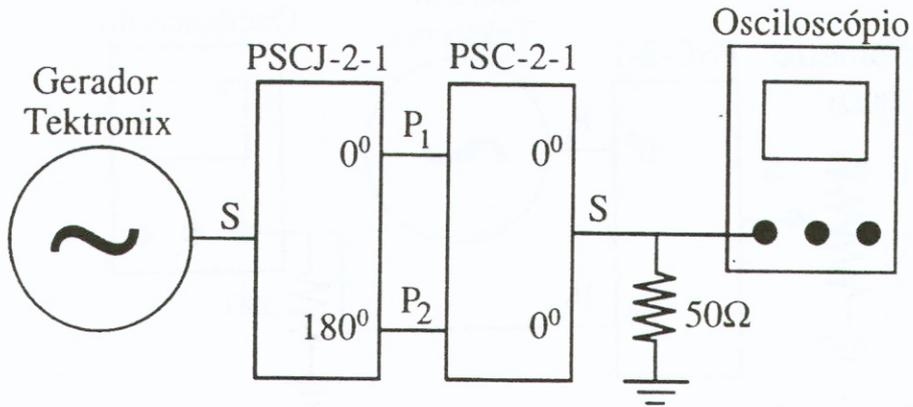


(f) Analise as duas saídas do divisor através do osciloscópio.

III.b. Combinadores de potência

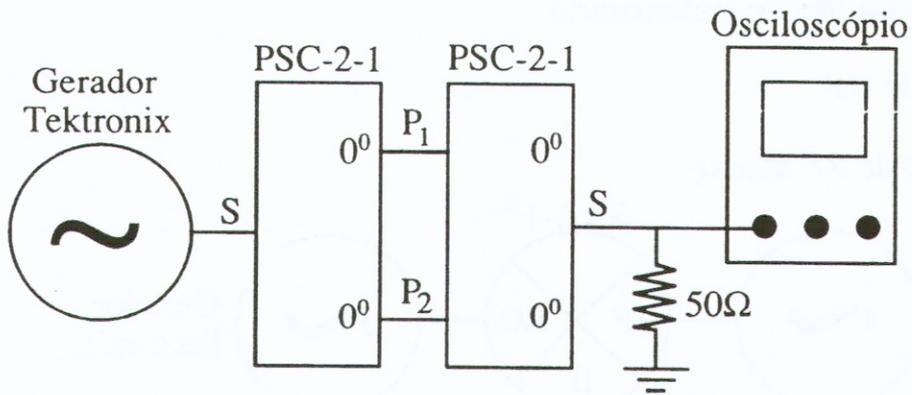


(a) Monte o circuito de RF abaixo



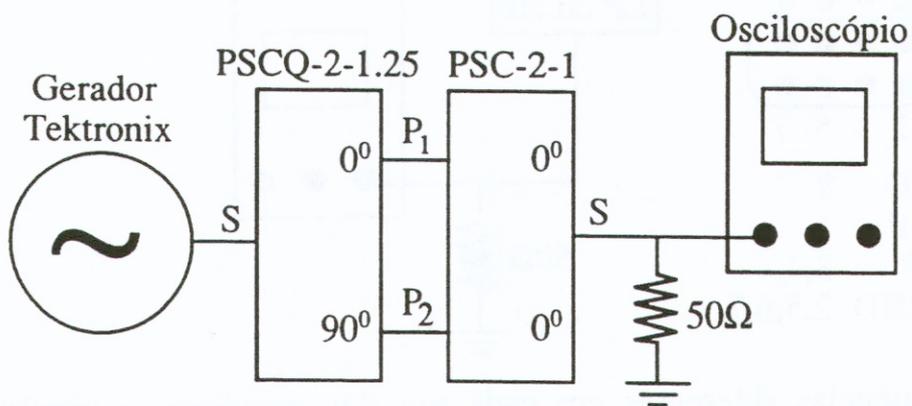
(b) Analise o resultado obtido no osciloscópio;

(c) Monte o circuito de RF abaixo



(d) Analise o resultado obtido no osciloscópio;

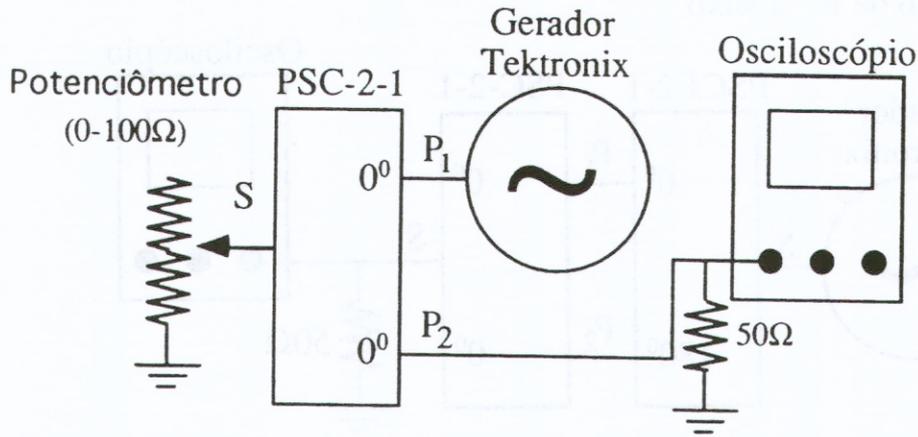
(e) Monte o circuito de RF abaixo



(f) Analise o resultado obtido no osciloscópio;

III.c. Monitor de impedância

(a) Monte o circuito de RF abaixo

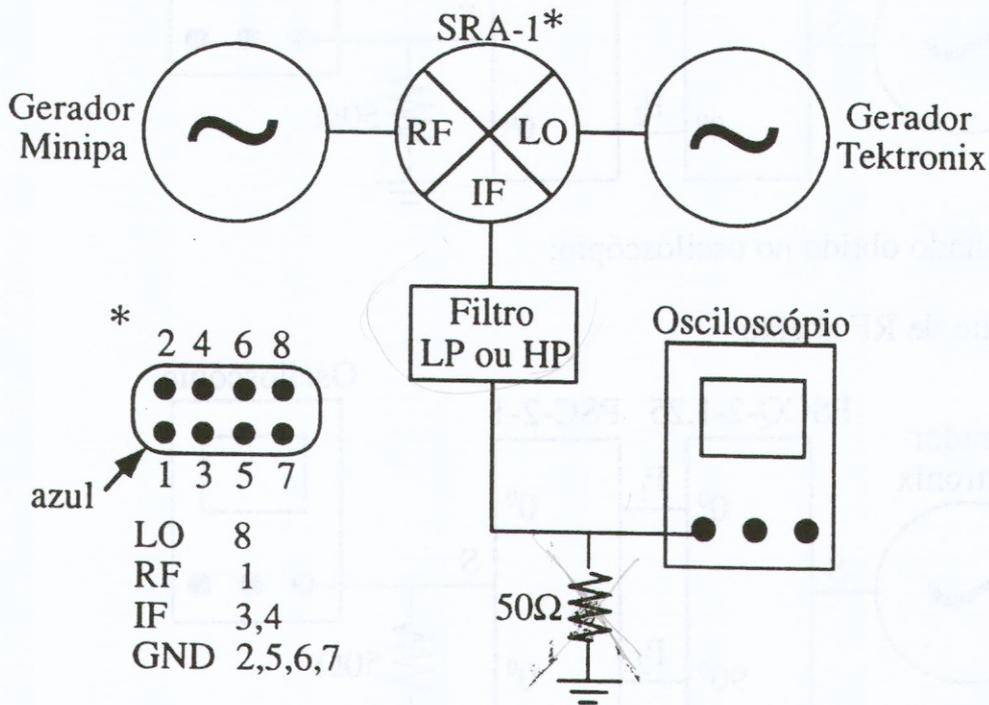


(b) Analise o resultado obtido no osciloscópio quando se altera o valor da resistência estabelecida no potenciômetro.

IV. Misturador Duplamente Balanceado

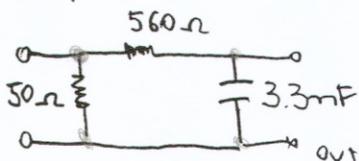
IV.a. Misturador de RF

(a) Monte o circuito de RF abaixo



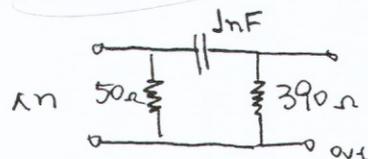
(b) Estabeleça frequências diferentes em cada um dos geradores e verifique a presença da frequência soma e diferença na porta IF, utilizando o osciloscópio e

Low pass



- 12 -

High pass

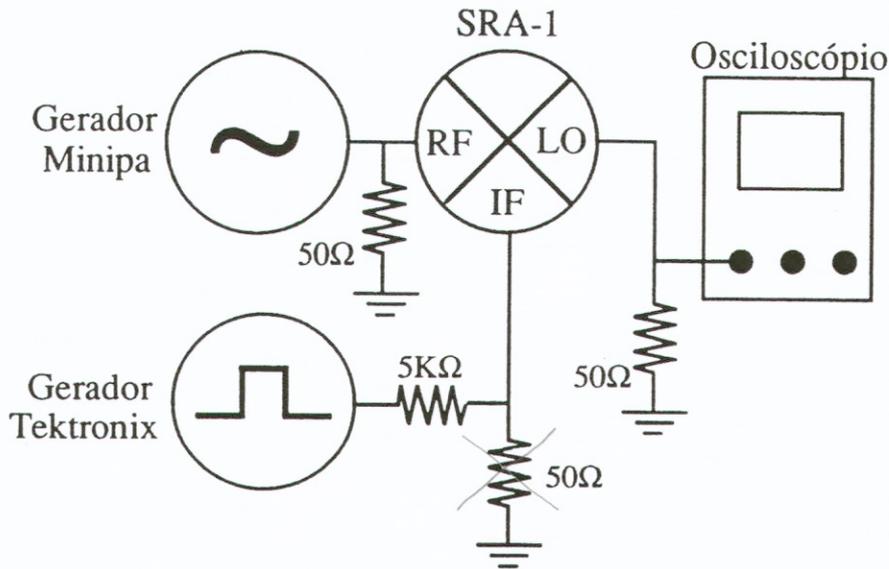


filtros passa-alta (“high-pass”, HP) e passa-baixa (“low-pass”, LP) respectivamente;

(c) Procure estabelecer frequências iguais nos dois geradores e observe a frequência soma na porta IF (utilize o filtro passa-alta);

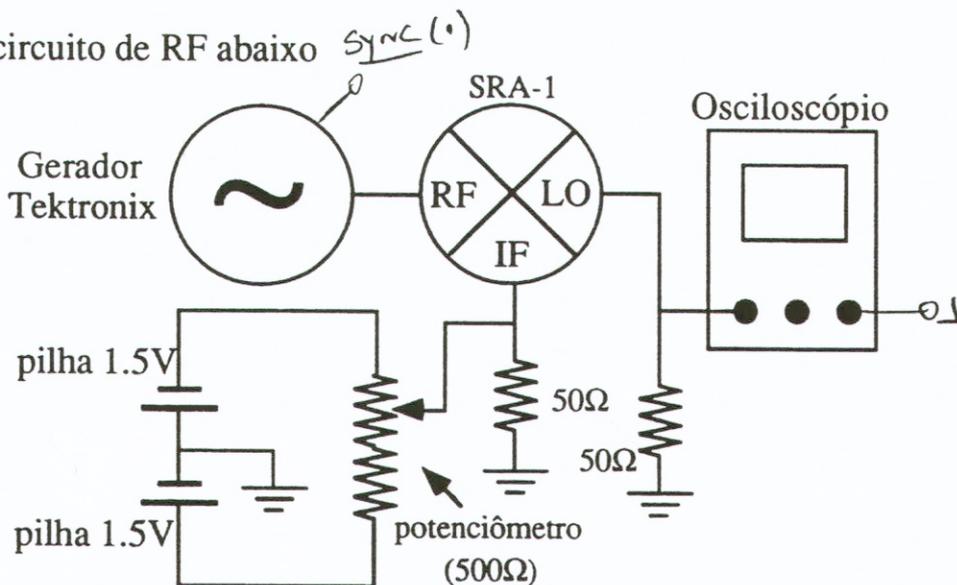
IV.b. Modulador de RF

(a) Monte o circuito de RF abaixo



(b) Verifique o chaveamento da RF pelos pulsos quadrados adequadamente fornecidos pelo gerador Tektronix;

(c) Monte o circuito de RF abaixo



(b) Verifique o controle da amplitude da RF pelo valor de tensão elétrica aplicada na porta IF;

Laboratório de Espectroscopia de Alta Resolução - RMN

Transmissores e receptores de RF

Objetivos:

Estudar os princípios de funcionamento de transmissores e receptores de RF homo e heterodinos.

1. Introdução

Conhecidos os componentes básicos de um espectrômetro, podemos agora apresentar o princípio de funcionamento dos transmissores e receptores de RMN.

2. Transmissores de RF

Para construirmos um transmissor de RF que possa produzir pulsos de RF com fase variando entre os valores 0° , 90° , 180° e 270° , utilizaremos os elementos estudados anteriormente, de acordo com os diagramas de blocos esquematizados nas figuras 1a e 1b. Estes tipos de transmissores são denominados homodinos, pois controlam a RF na frequência que ela é produzida pelo sintetizador.

Para melhorar o desempenho do transmissor, tanto em termos do intervalo de frequências que ele pode trabalhar quanto em termos da precisão de cada uma das fases utilizadas, utiliza-se o transmissor heterodino. Tal transmissor executa todo o tratamento de sinal em uma frequência fixa, denominada frequência intermediária (FI).

Escolhida a FI, todos os ramos do transmissor trabalharão nesta única frequência, figuras 2a e 2b. No entanto, para que possamos utilizar o transmissor para excitar núcleos atômicos, cuja frequência de ressonância é FR, devemos transformar FI para FR. Isto é feito utilizando-se um misturador de RF, onde em uma de suas entradas introduzimos o sinal FI produzido pelo transmissor e na outra entrada introduzimos um sinal proveniente da saída principal do sintetizador, e escolhida como sendo $FR+FI$. Obviamente, tomamos a frequência diferença na saída do misturador $(FR+FI)-FI$, a qual corresponde a frequência de ressonância do núcleo em análise. Usualmente, a frequência intermediária de um transmissor heterodino para RMN é gerada a partir de uma referência (tipicamente 10MHz) fornecida pelo sintetizador do espectrômetro, FI'.

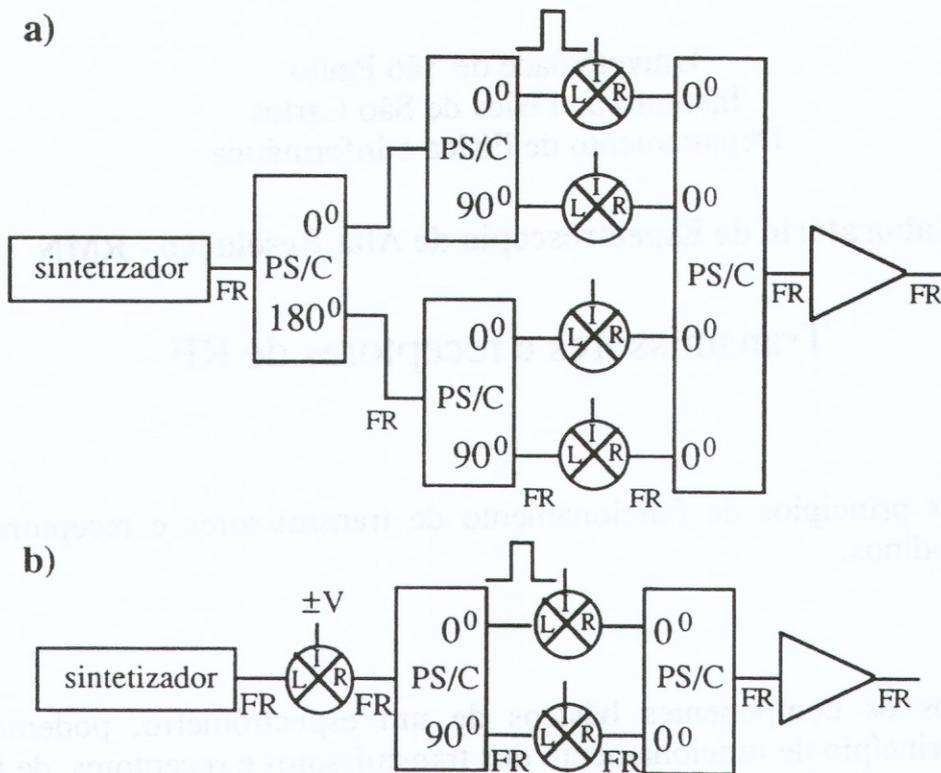


Fig. 1: Transmissores de RF homodinos.

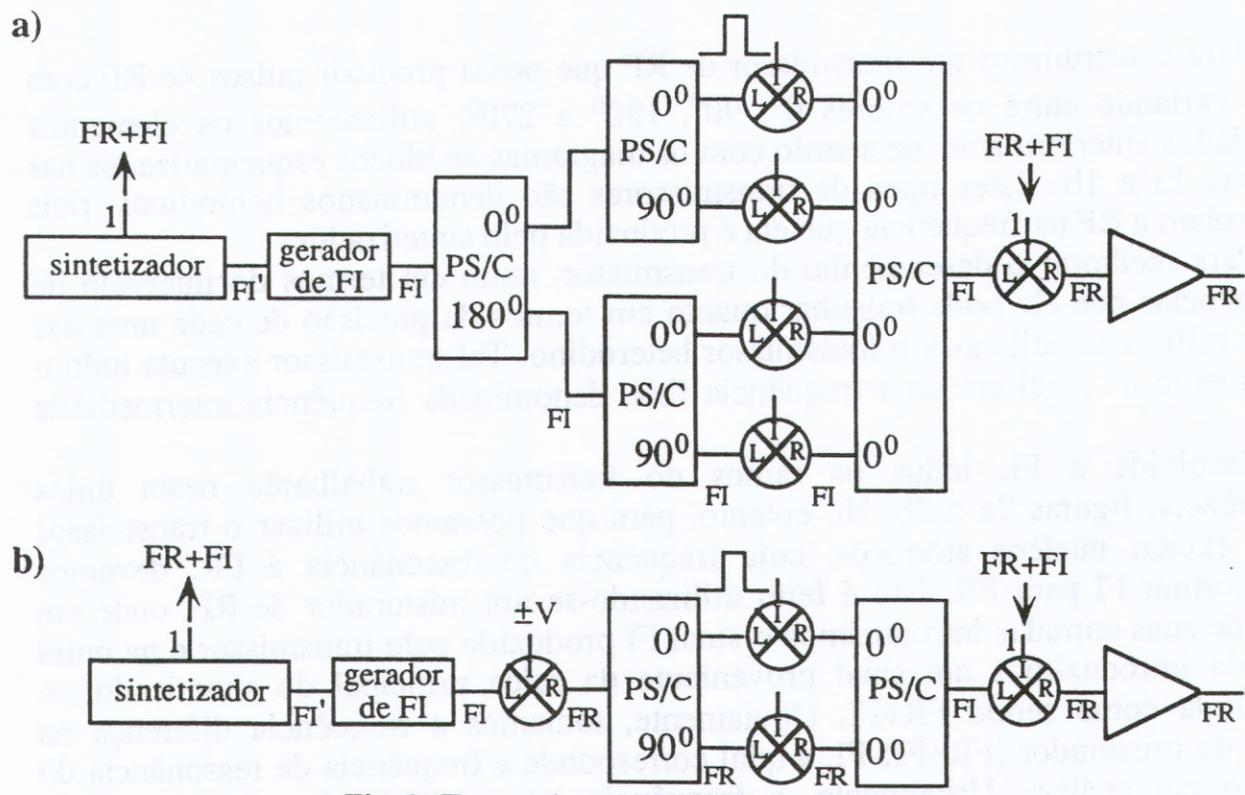


Fig. 2: Transmissores de RF heterodinos.

3. Receptores de RF

De forma similar à construção dos transmissores, podemos construir os receptores utilizando os "chips" de RF. Discutiremos as duas possibilidades: receptores homodinos e heterodinos.

O receptor tem como função transformar o sinal de RMN com frequência FR , em um sinal de RMN com frequência na faixa de áudio e fase pré-determinada, de modo a permitir a eliminação de alguns defeitos de detecção, sua digitalização e posterior processamento computacional.

Iniciaremos com a discussão do projeto de construção de um receptor homodino com detecção em fase e quadratura, Fig. 3.

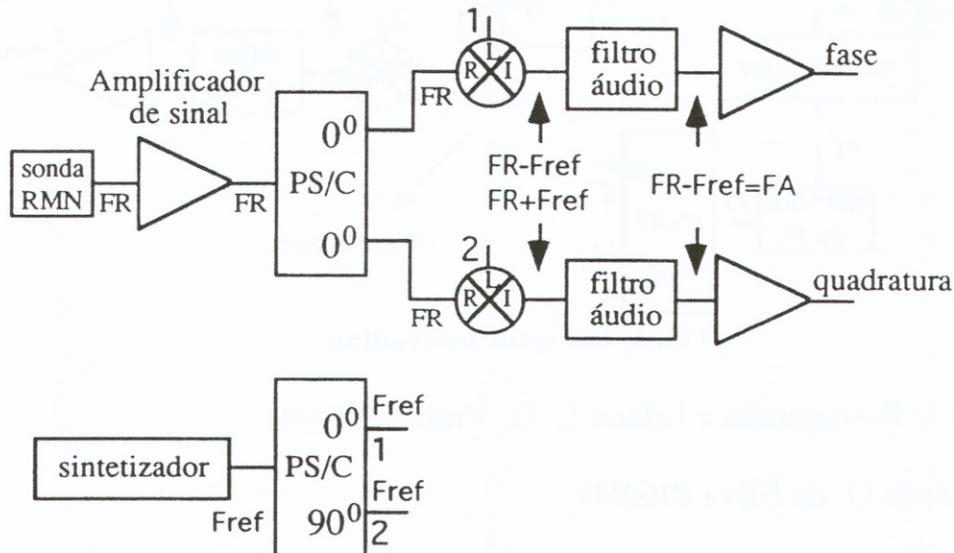


Fig. 3:Receptor homodino.

Neste caso, o sinal de RMN, com frequência FR , entra no receptor diretamente em divisor de potência ($0^\circ, 0^\circ$), o qual divide o sinal de RMN em dois sinais de RF idênticos. Estes dois sinais com frequência FR são destinados a dois misturadores, nos quais já foram introduzidos sinais de RF de referência provenientes da saída principal do sintetizador, divididos por um "splitter" ($0^\circ, 90^\circ$) e com frequência F_{ref} . FR e F_{ref} são muito próximas, sendo que a diferença entre elas, FA , está contida na faixa de áudio (variando de zero a centenas de KHz).

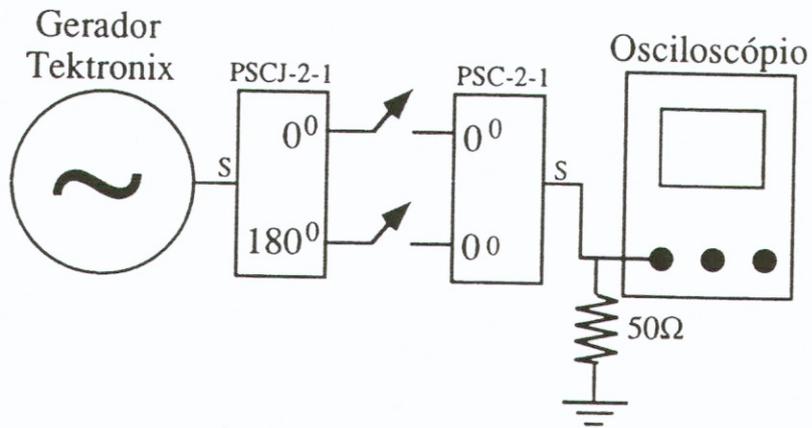
Na saída destes misturadores, escolhemos a frequência diferença entre FR e F_{ref} , que resulta em FA , por intermédio de um filtro passa-baixas, neste caso também chamado filtro de áudio (variando de Hz a centenas de KHz). Estes dois sinais de RMN, em quadratura e já situados na faixa de áudio, constituem os sinais de saída do receptor e seguem para os seguintes processamentos: digitalização, promediação e análise espectral via transformada de Fourier.

O receptor heterodino tem as mesmas funções do homodino, no entanto, os processamentos do sinal de RMN são realizados na frequência intermediária, Fig. 4.

Prática: Transmissores e receptores de RF

I. Transmissor de RF

(a) Monte o circuito de RF abaixo

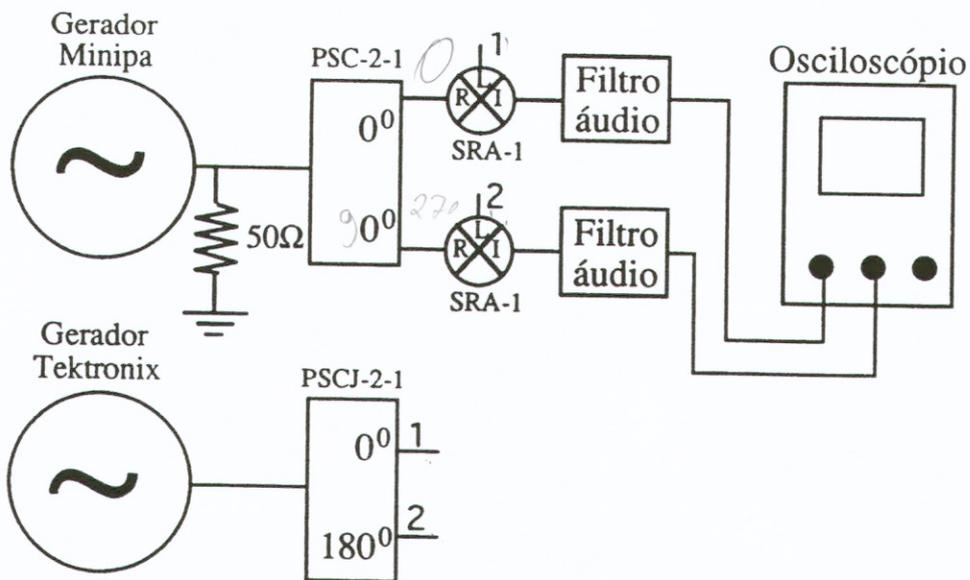


(b) Analise o comportamento deste circuito;

(c) Visite a bancada de demonstrações.

II. Receptor de RF

(a) Monte o circuito de RF abaixo



(b) Analise o comportamento deste circuito;

(c) Visite a bancada de demonstrações.

Laboratório de Espectroscopia de Alta Resolução - RMN

Sondas de Ressonância Magnética Nuclear

Objetivos:

Mostrar como projetar, construir e sintonizar uma sonda de RMN.

Introdução

Para excitarmos os núcleos atômicos de uma amostra é necessário colocá-la no interior de uma bobina, geralmente solenoidal, e aplicar sobre esta uma corrente alternada com a frequência de Larmor, com intensidade suficiente para que o campo magnético oscilante produzido, consiga retirar a magnetização nuclear de seu estado de equilíbrio ao longo do campo externo. Ao manipular-se esta potência de RF (~100W) torna-se necessário observar as condições de onda refletida pela carga, pois esta pode danificar os equipamentos utilizados. Como, normalmente, a impedância padrão para os equipamentos de RF é de 50Ω e a carga que se quer excitar é uma indutância, necessitamos projetar um circuito de RF para o casamento de impedâncias. Além disso, faz-se com que o indutor, L, pertença a um circuito ressonante para intensificar o valor de campo de RF produzido pela bobina. Como a bobina de detecção de sinal é a mesma da excitação, pelo princípio da reciprocidade, quanto mais alto é o valor do campo de RF produzido, mais sensível será a bobina para detectar pequenas variações de fluxo magnético. O circuito de RF adotado para este fim está esquematizado na Fig. 1.

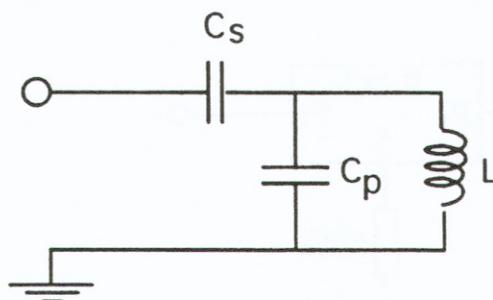


Fig. 1: Circuito de RF básico.

Os capacitores C_S e C_P são, respectivamente, colocados em série e em paralelo

com a bobina. Predominantemente, C_S controla a impedância e C_P a sintonia do circuito. Conhecendo-se a indutância, L , e o fator de qualidade, Q , da bobina de amostra, a impedância de entrada, R_0 , que se quer obter e a frequência de ressonância do circuito, ω , a qual deve ser igual à frequência de ressonância dos núcleos, podemos determinar os valores das duas capacitâncias a serem utilizadas pelas seguintes expressões:

$$C_S = \left[(Q\omega L - R_0) R_0 \omega^2 \right]^{-1/2} \quad (\text{Eq. 1})$$

e

$$C_P = \frac{QR_0\omega C_S - 1}{QR_0\omega^3 C_S L} \quad (\text{Eq. 2})$$

Os valores de Q e L são determinados experimentalmente via um medidor de fator de qualidade e ω é dado pela relação de Larmor.

Uma fórmula empírica muito útil para a determinação da indutância, L , de bobinas solenoidais, onde a separação entre as espiras é muito menor que o diâmetro do fio utilizado em sua construção, é dada por

$$L = \frac{n^2 \cdot r^2}{2.54 (9 \cdot r + 10 \cdot \ell)} \quad (\text{Eq. 3})$$

onde a indutância L é determinada em micro-Henries, n é o número de espiras, r é o raio das espiras e ℓ é o comprimento da bobina, ambos em centímetros.

Uma vez construído o circuito de RF podemos proceder a sintonia. Esta pode ser feita utilizando-se um gerador de varredura e um divisor de potência. Este último é utilizado porque sua porta P_1 é isolada da porta P_2 , quando se introduz uma impedância de 50Ω em sua porta S , Fig. 2.

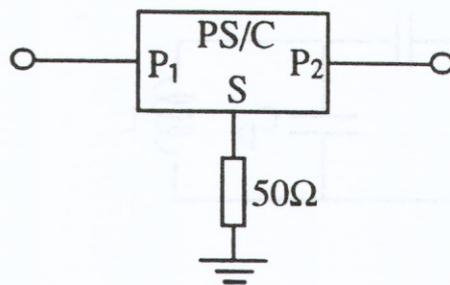


Fig. 2: Isolação das portas A e B do divisor de potência.

O circuito de RF é então conectado ao gerador de varredura e a um osciloscópio,

por meio de um divisor de potência, Fig. 3. O gerador de varredura injeta no divisor de potência um sinal de frequência variável entre dois extremos conhecidos, uma marca na frequência onde se deseja o acoplamento e um sinal de sincronismo para o osciloscópio trabalhar em modo xy. Quando o circuito for sintonizado na frequência desejada e possuir impedância de 50Ω ela não deverá aparecer na tela do osciloscópio, Fig. 3, já que ocorre máxima transferência de potência entre o gerador de RF e o circuito de RF (casamento de impedâncias). Este procedimento é denominado sintonia por reflexão.

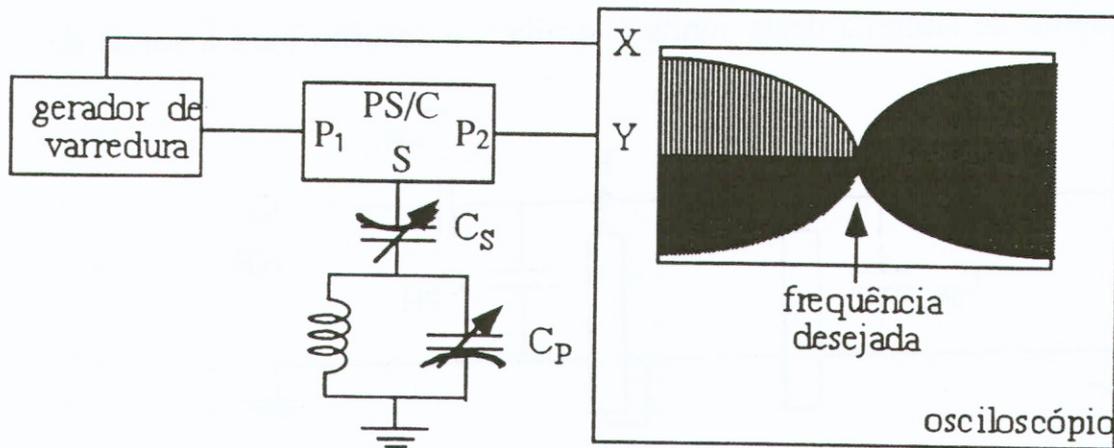


Fig. 3: Circuito para a sintonia da sonda.

Sonda de dupla ressonância

Quando se deseja trabalhar em dupla ressonância, torna-se necessário construir um circuito que permita a excitação da amostra em duas frequências diferentes. Ele deve ser construído de tal forma a não produzir ondas refletidas nos transmissores, bloquear a passagem de RF de um circuito para outro e permitir a sintonia das duas frequências independentemente.

O desacoplamento dos dois circuitos ressoadores pode ser feito utilizando-se, por exemplo, a propriedade das linhas quarto de onda:

$$Z_0^2 = Z_{in} * Z_{out} \quad (\text{Eq. 4}),$$

onde Z_0 é a impedância característica da linha (50Ω), Z_{in} é a impedância de entrada da linha e Z_{out} é a impedância de saída da linha. Com esta propriedade, podemos construir um circuito de dupla ressonância com apenas uma bobina, Fig. 4.

Para facilitar nossas considerações, utilizaremos o caso onde se trabalha com o par de núcleos atômicos carbono-hidrogênio e definiremos as duas frequências de ressonância como sendo uma de alta frequência, HF, (para hidrogênio) e outra de

baixa frequência, LF, (para carbono 13).

Os cabos de quarto de onda são sintonizados para a HF, o que torna a montagem mais compacta. Para a HF, o cabo de quarto de onda curto circuitado ao terra, comporta-se como uma linha de alta impedância, e o aberto como um curto circuito ao terra. Deste modo, o circuito de RF para a HF comporta-se da mesma forma que o circuito de RF simples da Fig. 1. No ramo de LF as linhas não estão sintonizadas e já não possuem características de transformadoras de impedância. Neste caso, elas se comportam, aproximadamente, como um circuito aberto no ponto A e como um ramo de baixa impedância para o terra no ponto B, resultando novamente no circuito da Fig. 1.

O procedimento de sintonia desta sonda é similar ao descrito para a sonda de RMN simples.

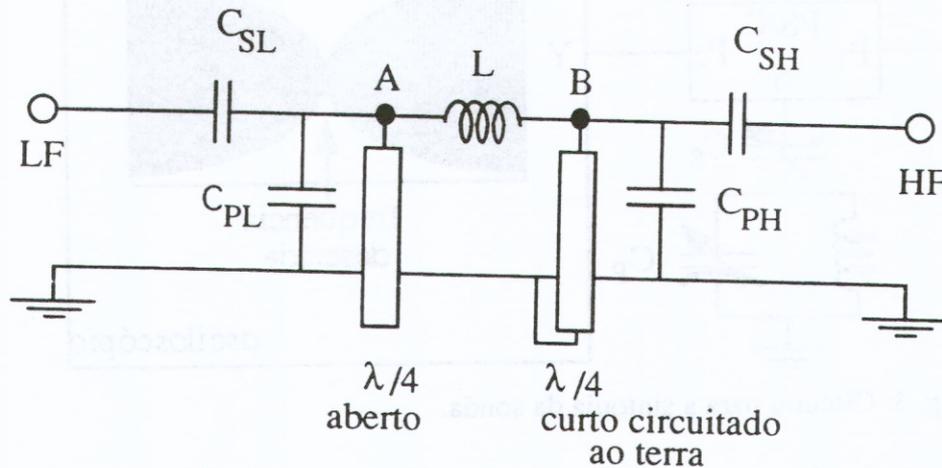


Fig. 4: Circuito de RF com apenas 1 bobina.

Autores: Tito J. Bonagamba e Edson L. G. Vidoto (06/94).

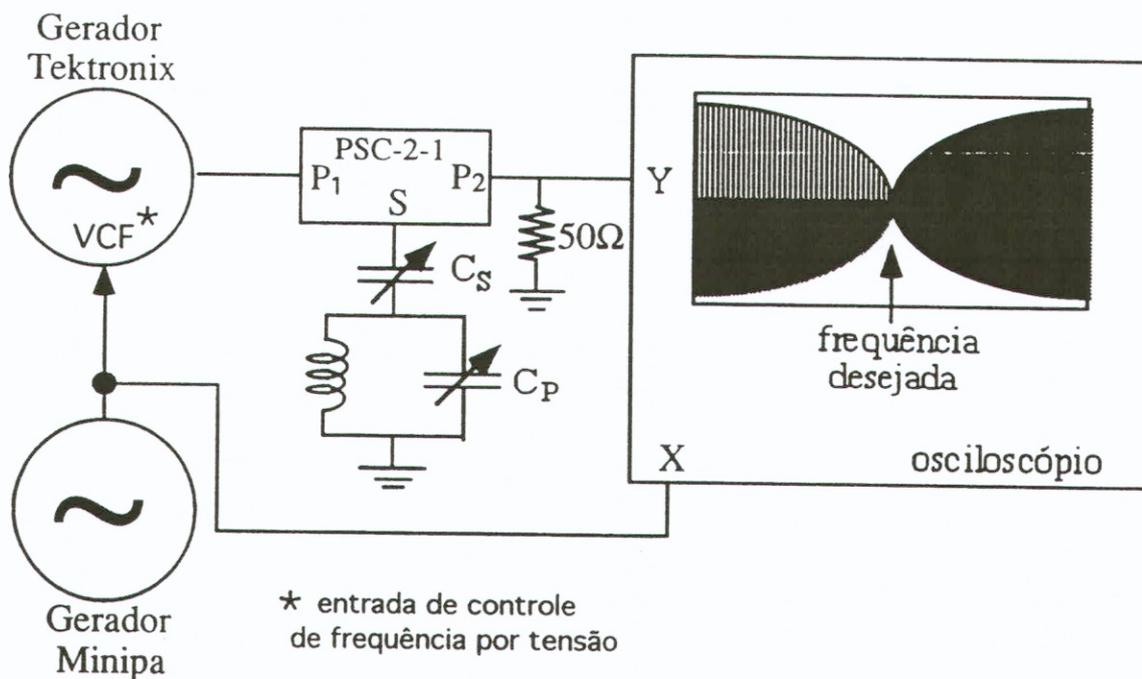
Revisão: Eduardo G. da Silva (06/94).

Bibilografia:

1. Bonagamba, T.J., Espectroscopia de Alta Resolução em Sólidos por RMN, São Carlos (Tese de Doutorado), Instituto de Física de São Carlos-Departamento de Física e Informática-USP, 1991.
2. Bonagamba, T.J., Vidoto, E.L.G., Manual de Construção de Sondas de RMN simples e dupla, Instituto de Física de São Carlos-Departamento de Física e Informática-USP, 1991.
3. The ARRL Handbook for the radio amateur, sixty-fifth edition, The american radio relay league, 1988.

Prática: Sondas de Ressonância Magnética Nuclear

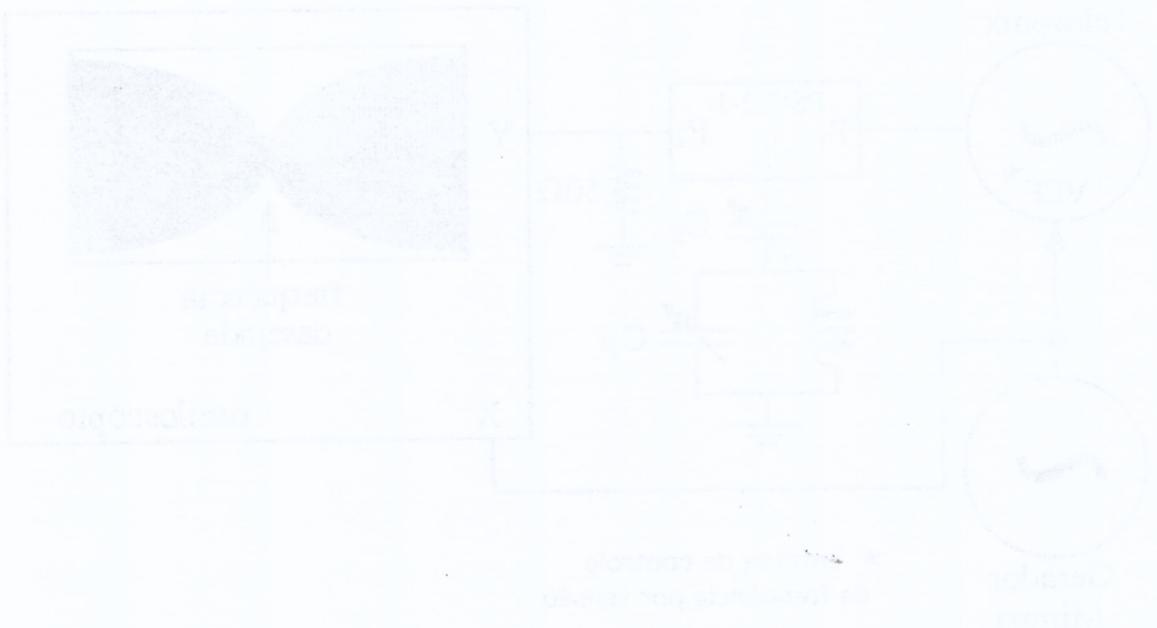
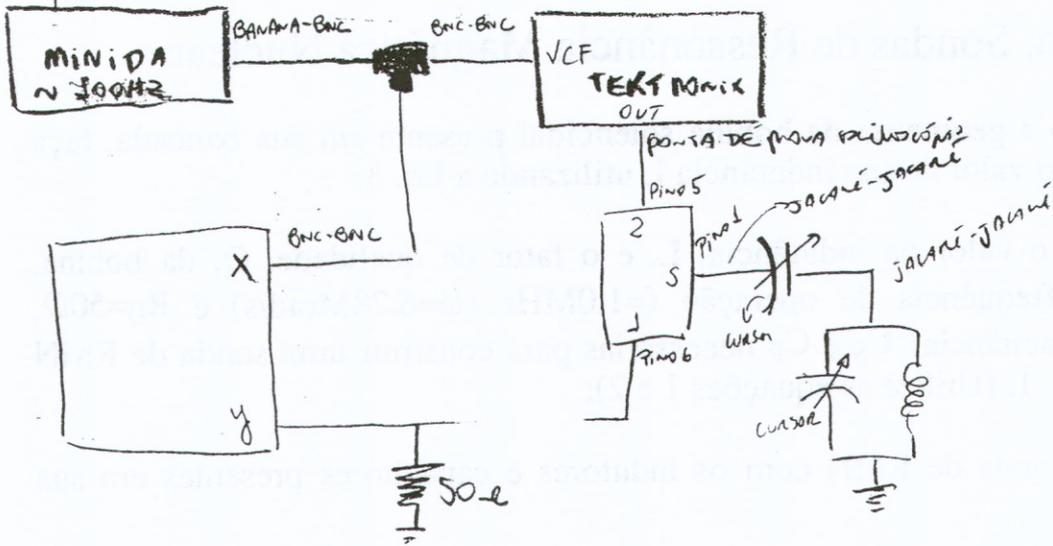
- * (a) Conhecendo a geometria da bobina solenoidal presente em sua bancada, faça uma estimativa do valor de sua indutância L utilizando a Eq. 3;
- (b) Conhecendo o valor da indutância, L , e o fator de qualidade, Q , da bobina, tomando como frequência de operação $f=1.0\text{MHz}$ ($\omega=6.28\text{Mrad/s}$) e $R_0=50\Omega$, determine as capacitâncias C_S e C_P necessárias para construir uma sonda de RMN tal como a da Fig. 1. (Utilize as equações 1 e 2);
- (c) Monte uma sonda de RMN com os indutores e capacitores presentes em sua bancada;
- (d) Monte o circuito de RF abaixo



e analise o seu comportamento variando o valor das capacitâncias e introduzindo diferentes materiais presentes em sua bancada no interior da bobina;

(e) Utilizando uma bobina de "pick-up", verifique a orientação do campo magnético de RF produzido no interior da bobina da sonda de RMN (lembre-se da Lei de Ampère);

(f) Visite a bancada de demonstrações.



o teste e seu comportamento verificado a partir das respostas e interpretando diferentes respostas praticadas em seu banco de no interior do laboratório.

(c) Utilizando uma bobina de "pick-up", verifique o comportamento da tensão induzida de RF produzida no interior da bobina da sonda de RFM durante as três leituras.

(d) Vista a parte de transmissão

Laboratório de Espectroscopia de Alta Resolução - RMN

Conexões entre transmissores, receptores e sondas de RMN

Objetivos:

Mostrar como conectar, de forma simples, os três componentes básicos de um espectrômetro de RMN: transmissor, sonda e receptor.

1. Introdução

A sonda de RMN fica situada entre o transmissor e o receptor. Deste modo, a sonda deve receber pulsos de RF com potência da ordem de 100 Watts e deve fornecer ao receptor sinais de RMN com potência da ordem 0.000000001 Watts. Portanto, de alguma forma, devemos fazer com que os pulsos de RF sejam totalmente fornecidos a sonda e evitar que parte desta potência seja transferida para o receptor, Fig. 1.

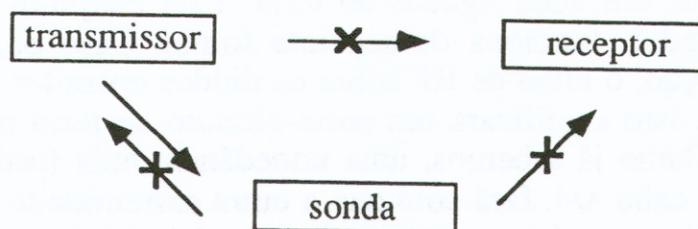


Fig. 1: Trajetórias permitidas e proibidas para os pulsos de RMN.

Caso isto não ocorra, os estágios de amplificação primários de sinal de baixíssimo nível do receptor sofrerão uma saturação tão grande que não se recuperarão em tempo suficiente para detectar o sinal de RMN (tempo morto do receptor). Em alguns casos, estes mesmos estágios de amplificação poderão ser destruídos. Assim, a forma com que são conectados o receptor, a sonda e o transmissor, vai, de certo modo, definir a qualidade do espectrômetro. Utilizando alguns dos componentes básicos discutidos anteriormente, discutiremos algumas formas de conexão adequada entre eles.

2. Sistema RF de ressonância simples

A sonda de RMN é conectada ao transmissor e ao receptor de RF conforme

esquemático na Fig. 2.

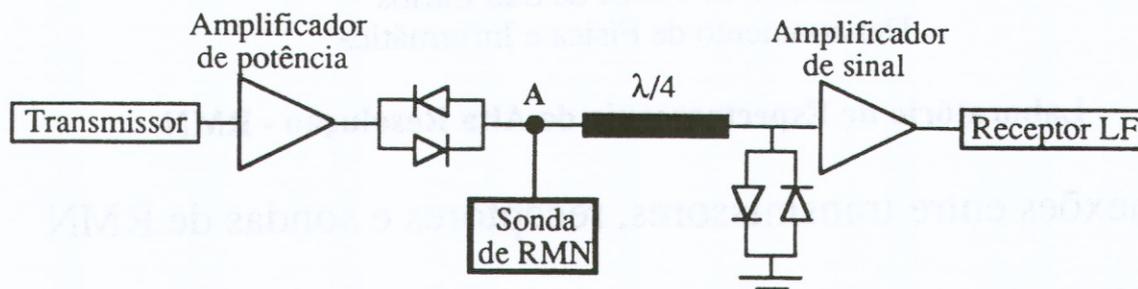


Fig. 2: Diagrama de blocos de um sistema RF de ressonância simples.

O ramo de amplificação consiste de transmissor, amplificador de potência e n pares de diodos cruzados, todos ligados em série ao ponto A do diagrama, o qual alcança a entrada da sonda. A função dos diodos cruzados na configuração indicada, é eliminar o ruído de baixo nível quando o amplificador, que se mantém ligado durante todo o experimento, não está sendo utilizado para amplificar os pulsos de RF. O número de pares de diodos cruzados dependerá do nível de ruído gerado pelo amplificador.

Para impedir que os pulsos de RF possam atingir o ramo de detecção de sinal, utilizamos um cabo quarto de onda para a frequência de ressonância do núcleo em análise e pares de diodos cruzados ligados ao terra. Este conjunto de elementos, cabo $\lambda/4$ e diodos cruzados, funciona da seguinte forma. Caso os pulsos de RF atinjam o ramo de detecção, o nível de RF sobre os diodos cruzados será suficiente para fazê-los conduzir e isto significará um curto-circuito ao terra na extremidade posterior do cabo $\lambda/4$. Como já sabemos, uma impedância nula (próxima de zero) em uma extremidade do cabo $\lambda/4$, fará com que a outra extremidade apresente uma impedância infinita (muito grande no caso real), a qual impedirá a passagem dos pulsos de RF para o ramo de detecção. Para sinais de baixo nível, tal como os sinais de RMN, os diodos não conduzirão e, como tanto a sonda como o receptor possuem impedância igual a 50Ω , o cabo $\lambda/4$ apenas conduzirá o sinal sem interferir em sua amplitude.

O desempenho desta configuração, Fig. 2, dependerá da "sintonia" da sonda, a qual definirá o casamento de impedâncias entre o transmissor e a sonda e, conseqüentemente, obedecerá a condição de máxima transferência de potência.

3. Sistema RF de ressonância dupla

No caso de sondas de dupla ressonância a situação mais crítica envolve a detecção de sinal de RMN enquanto ocorre o desacoplamento, levando à utilização de mecanismos de isolamento entre os ramos de detecção e excitação mais arrojados, Fig. 3.

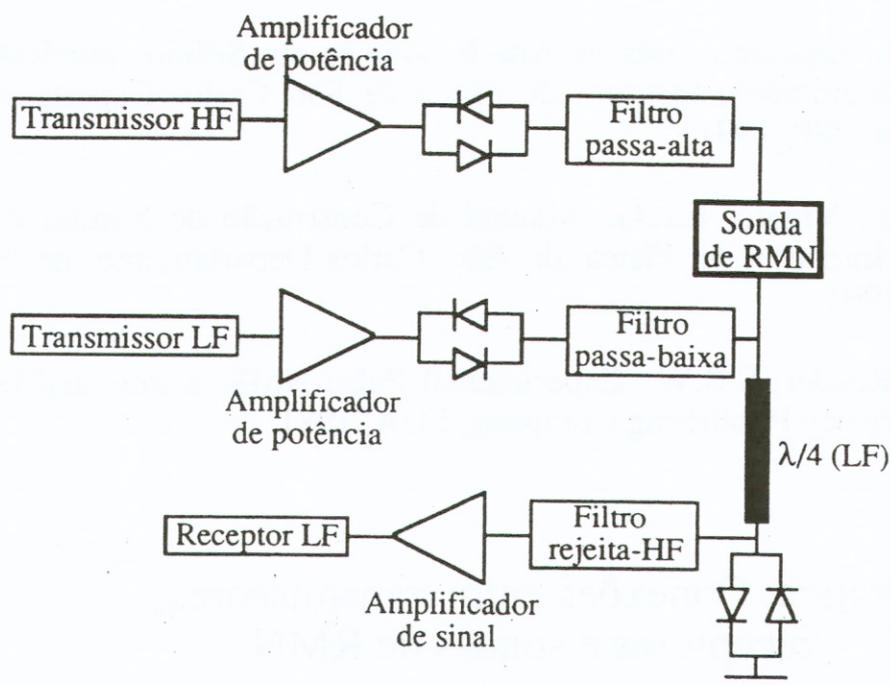


Fig. 3: Diagrama de blocos de um sistema RF de ressonância dupla.

No entanto, utilizamos todos os elementos do circuito de ressonância simples. Para facilitar nossas considerações, utilizaremos o caso onde se trabalha com o par de núcleos atômicos carbono-hidrogênio e definiremos as duas frequências de ressonância como sendo uma de alta frequência, HF, (para hidrogênio) e outra de baixa frequência, LF, (para carbono 13). Assim, para realizar um experimento de “desacoplamento”, o ramo de baixa frequência é semelhante ao da ressonância simples, porém são introduzidos filtros adicionais para garantir a eliminação do sinal de alta frequência que atravessa a sonda e atinge o ramo de detecção de carbono. No ramo de excitação em alta frequência, utilizamos diodos cruzados para eliminar sinais de baixo nível do amplificador de potência, tal como no caso da ressonância simples, e filtros passa-alta. Um dos ruídos de alto nível que os amplificadores de potência para desacoplamento podem produzir está exatamente na frequência LF, o qual pode atravessar a sonda e se comportar como se fosse um sinal de RMN de carbono, destruindo totalmente a aquisição do sinal desejado. Por esta razão, o projeto dos filtros de RF posicionados após o transmissor de HF é de grande importância para obtenção de bons sinais de RMN.

Autores: Tito J. Bonagamba e Edson L. G. Vidoto (06/94).

Revisão: Eduardo G. da Silva (06/94).

Bibliografia:

1. Bonagamba, T.J., Espectroscopia de Alta Resolução em Sólidos por RMN, São Carlos (Tese de Doutorado), Instituto de Física de São Carlos-Departamento de Física e Informática-USP, 1991.
2. Bonagamba, T.J., Vidoto, E.L.G., Manual de Construção de Sondas de RMN simples e dupla, Instituto de Física de São Carlos-Departamento de Física e Informática-USP, 1991.
3. Fukushima, E., Roeder, S.B.W., Experimental Pulse NMR: a nuts and bolts approach, Addison-Wesley Publishing Company, EUA, 1981.

Prática: Conexões entre transmissores, receptores e sondas de RMN

- (a) Visite a bancada de demonstrações.