

## Antenas Magnéticas

A *Loop antenna* é uma solução possível para usar quando se tem pouco espaço relativamente ao comprimento de onda em espaço livre da frequência que se quer radiar ou receber. O termo *small antenna* aplica-se quando a antena cabe numa esfera com o diâmetro de cerca de 30% do comprimento de onda. Na prática estas antenas trabalham abaixo da sua frequência de ressonância natural.

São usadas em dispositivos de RF pequenos. Como têm uma dimensão bastante menor do que o comprimento de onda são normalmente aproximadas por indutâncias que se fazem entrar em ressonância com uma pequena capacidade, o que lhes dá uma grande seletividade, bastante maior do que a conseguida com dispositivos ressonantes baseados em linhas de transmissão. São normalmente designadas por antenas magnéticas pois são mais sensíveis ao campo magnético do campo eletromagnético do que as antenas dipolo que são mais sensíveis ao campo elétrico. O facto de a maior parte do ruído industrial próximo de um recetor ter uma natureza mais de perturbação elétrica, as antenas magnéticas são vantajosas na redução do ruído captado.

Claro está que quando a dimensão das antenas é uma fração pequena do comprimento de onda a corrente na antena é aproximadamente constante ao longo da antena e esta diz-se ser uma antena magnética. Mas se a dimensão é uma fração considerável do comprimento de onda o carácter magnético esvanece-se e a antena é eletromagnética, interessando tanto o campo magnético como o elétrico. A antena deixa de ser tão seletiva na frequência.

Estas antenas também são usadas para transmitir e receber sinais de rádio com elevada potência quando não há muito espaço físico, o que é especialmente útil na emissão de ondas curtas. Há simuladores na internet especialmente adaptados às antenas de onda curta e de pequena dimensão física ver por exemplo [1], [2] e [3].

Estas antenas têm uma resistência de radiação bastante baixa relativamente às antenas monopolo e dipolo e têm necessidade de trabalhar com correntes muito altas para radiarem a mesma potência. Uma forma interessante de uma antena em espiral é a de uma espira aberta, Fig.1, com o condensador C colocado na abertura. O condensador é fundamental para compensar a reactância da espira e permitir a circulação de correntes muito elevadas na antena.

A baixa resistência de radiação obriga a usar um adaptador de impedâncias e isto pode ser feito com o chamado "Faraday Loop" - uma espira L2 com cerca de  $\frac{1}{4}$  do diâmetro da espira radiante, Fig.1 e forma um transformador como a espira principal, ver [4].

A estrutura da Fig. 1 obriga a ter um condensador C flutuante (não ligado à malha do cabo coaxial) e a espira principal L1, com a indutância I1, fica ligada à malha do cabo, na sua parte inferior, Fig.1.

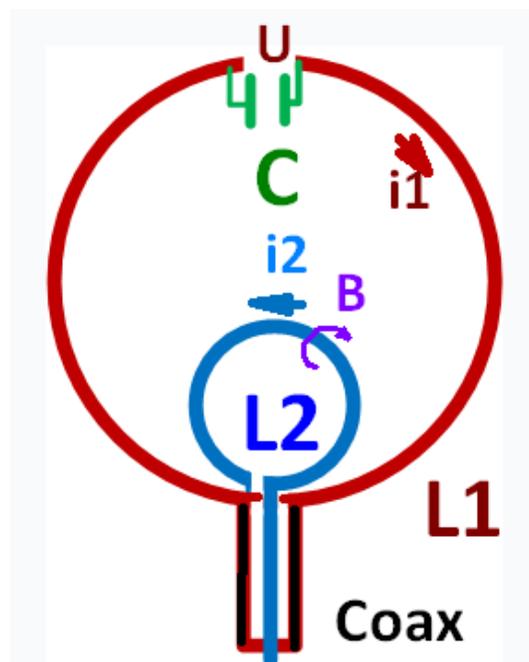


Fig. 1 - Loop Antenna.

A corrente na espira L2, através da autoindução de L1, induz uma força eletromotriz na espira L1 que nos terminais superiores origina uma tensão U e esta, por sua vez, origina uma corrente  $i_1$  muito elevada (na frequência de ressonância de L1 e C).

## O limite de Chu–Harrington

O teorema de Chu-Harrington foi estabelecido em vários trabalhos dos autores que ocorreram entre 1948 e 1960 por [Lan Jen Chu](#) (1913-1973), [Harold Wheeler](#) (1993-1996) e depois por [Roger Harrington](#) (1925-...). Este teorema diz-nos que o fator de qualidade Q de uma antena (Q é a relação entre a energia eletromagnética radiada e a energia de perdas) depende do volume esférico ocupado pela antena e o comprimento de onda. Para uma antena numa região esférica de raio  $a$  radiar com o comprimento de onda  $\lambda$ , [se considerar sem perdas](#) deve-se ter  $Q \geq 1/k^3 a^3 + 1/(ka)$  onde  $k=2\pi/\lambda$ , para uma antena de polarização linear e cerca de metade desse valor para uma polarização circular. Ver também o [artigo de R. Hansen](#) de 1981.

## Dois exemplos de Loop Antenna

De seguida referem-se dois exemplos de *Loop Antenna* uma gigante, projetada para transmissão de energia sem contacto, a distâncias de alguns metros, mas que também serve como antena de transmissão e recepção de rádio em ondas curtas e, outro exemplo de uma micro antena com dimensões milimétricas realizada num chip com tecnologias de filme fino.

### Antena de Onda Curta

Apenas como exemplo, as antenas em espiral que construímos para [transmissão de energia sem fios](#), que estão na sala 0.77 do ISTTaguspark, podem funcionar entre 7 MHz e 20 MHz com a sintonização apropriada do condensador C na frequência do sinal que chega através do cabo coaxial.

Com uma potência de excitação de 50 W são desenvolvidos entre 5 kV e 10 kV aos terminais da espira L1 uma barra de alumínio muito espessa e larga. A tensão de radiofrequência desenvolvida entre as duas metades da espira evolui desde 0 V, na base da espira L1, até 5 kV aos seus terminais superiores. A experiência mostrada [no vídeo](#) ilustra um caso raro de uma visita que particamente na sente a radiofrequência enquanto outros experimentadores mal afastam as mãos da base da espira L1 não suportam o choque de RF. O campo eletromagnético à volta da espira L1 é extremamente intenso e a experiência mostra que os jovens particamente não sentem o campo eletromagnético enquanto outros, mais velhos, sentem uma irritação corporal "[um formigueiro](#)" induzido pelo campo extremamente intenso.

### Antena magnética "on Chip"

No lado oposto do acima referido, entrando no domínio das microantenas em chip, construímos uma extremamente pequena para 150 MHz usada para um sistema de RF ID dotado de sensores magnéticos autoalimentados por um campo eletromagnético externo [5]. Este trabalho pioneiro consistiu na tese de PhD da aluna do IST Rita Macedo [6], realizado em 2011, e foi reforçado em 2019 com a tese de PhD de Rafaela Ribeiro [7].



## Antenas Magnéticas para Cubesats

O estudo que se segue visa perceber a viabilidade de usar antenas magnéticas em satélites do tipo Cubesat como o ISTsat-1, um cubo com 10 cm de aresta. Este assunto tem sido [tema de investigação](#) dado que os satélites do tipo CbeSat são muito pequenos e [não podem acomodar antenas grandes](#).



**Fig. 2- Antenas magnéticas com 10 cm de dimensão máxima.**

- 1- Antena com 30 espiras e 2 bandas (I- 0,5 MHz a 1 MHz e II- 1 MHz a 2 MHz);**
- 2- Antena com 7 espiras e 2 bandas (I- 4 MHz a 12 MHz e II – 12 MHz a 24 MHz);**
- 3- Antena cm 1 espira (400 MHz a 490 MHz);**
- 4- Antena com 1 espira (80 MHz a 150 MHz);**
- 5- Antena espiral de banda larga sobre plano de referência também em forma de espiral (1 GHz a 10 GHz).**

Para fazer este estudo partiu-se de uma base experimental usando antenas magnéticas com o diâmetro máximo de 10 cm (dimensão da face do cubo), existentes na loja Aliexpress, ver Fig.2.

Vamos dar um destaque especial às antenas 3, 4 e 5 representadas na Fig. 2.

Os instrumentos de medida usados, nesta primeira fase, foram. Rohde& Schwartz FH4, (network, spectrum, antenna analyzer & power meter), Nanovna F V3a, Nanovna-H e Hewllet Packard HP8753 dotado dos acessórios HP 85046A e HP85044A.

Depois de verificar que a resolução dos Nanovnas era suficiente, para esta primeira abordagem da caracterização experimental, decidimos pelo seu uso devido à facilidade conseguida pelo seu aspeto físico miniatura.

Nesta primeira fase do estudo não estamos concentrados no ganho e no ruído das várias antenas, o que faremos numa segunda fase, mas estamos concentrados na possibilidade de ser possível cobrir uma banda larga de frequências com este tipo de antenas miniatura.

### Antena magnética com 50 mm de diâmetro (L50)

Esta antena (3 da Fig.2), designada por L50, tem a espira L1 com 50 mm de diâmetro exterior e 43 mm de diâmetro interior. A espira L2 (a Faraday Loop) tem 10 mm de diâmetro interior e 14 mm de diâmetro exterior. Esta antena tem a estrutura representada na Fig. 1 e originalmente trás um condensador variável ligado entre as duas extremidades da espira.

A espira L1 está duplicada nas duas faces de um suporte em fibra de vidro (FR4) ligadas por 18 furos metalizados de 1,5 mm de diâmetro. A espira L2 só está impressa na face de cima. Esta estrutura visa reduzir a resistência série da espira L1, o que é fundamental para aumentar o fator de qualidade da espira. Na fig. 3 pode observar-se esta antena montada no Nanovna H4, já com o condensador C, variável, retirado. Com o condensador C montado a antena entra em ressonância entre 320 MHz e 490 MHz, dependendo da capacidade ajustada no condensador variável. A antena é especificada para funcionar entre 400 MHz e 490 MHz, mas cobre uma banda mais larga, nomeadamente nas frequências baixas.

Esta antena radia na direção ortogonal ao seu plano nas duas direções /frontal e traseira). Mais adiante iremos colocar um plano metálico atrás da antena (Plano de Terra, designado por **PTFR4**), com 85 mm x 85 mm, colocado a 1,54 mm da face traseira de L1 com um isolamento separador em FR4, de modo a que esta radie apenas na direção frontal. Esta solução do plano de Terra possibilita o uso de um painel solar com *magnetorquer* desenhado neste plano de Terra e ainda a utilização de um painel solar na traseira da antena, solução que parece ser atraente no caso de um cubesat 1U.

Quando o condensador é retirado a ressonância observa-se em 770 MHz e é alterada para 850 MHz quando se coloca uma superfície plana metálica a uma distância de 5 mm da face traseira da antena. Este aumento da frequência de ressonância já era esperado. Note-se que, agora, já não é espectável que a largura de banda da antena seja tão baixa como era com a utilização do condensador.

Nas frequências mais baixas onde a antena funciona de forma mais aproximada a uma antena magnética (ela é mais aproximada a uma autoindução) enquanto agora funciona como uma antena distribuída na forma de um halo e a largura de banda é mais larga.

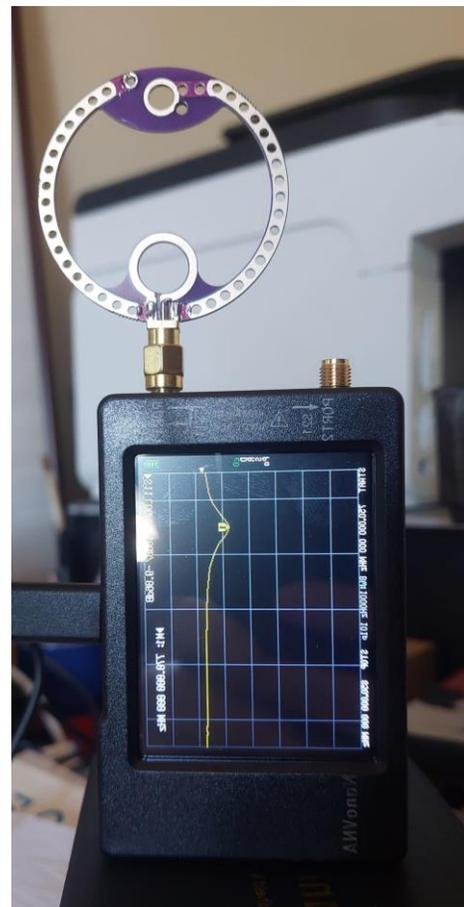


Fig. 3- Antena magnética 3, sem C.

## A sintonia da antena L50 com diferentes capacidades

Foi introduzida uma pequena fita de cobre com 3 mm de largura, soldada no extremo esquerdo da espira L1 de modo a deixar um espaço de cerca de 1 mm para o pequeno círculo (extremo direito de L1). O espaço entre os extremos da antena passou de 2 mm para 1mm.

Esta antena, carregada com o condensador de 0 pF, passa a designar-se por L50C0.

### Antena L50C0

A frequência de ressonância passou de 770 MHz para 720 MHz, sendo agora a largura de banda de 7 MHz ( $\pm$  3,5 MHz). Na frequência de ressonância a antena seria agora equivalente a uma autoindução de 11 nH em série com um condensador de 4,5 pF.

Com o intervalo reduzido é agora possível soldar, entre a fita e o pequeno círculo, pequenos condensadores com o formato 0603 (1,5 mm x 0,75 mm) de modo a obter uma variação da frequência de ressonância da antena, dando origem a diferentes características de antenas que designaremos por L50Cx, de acordo com o valor x da capacidade do condensador usado. O condensador C tem uma grande influência no comportamento da antena como veremos de seguida.

### Antena L50C05

Com a antena carregada com condensador de 0,5 pF a frequência de ressonância passou para 506 MHz.

### Antena L50C05PTFR04

Com a antena carregada com condensador de 0,5 pF e a utilização do plano de Terra, a frequência de ressonância passou para 600 MHz.

### Antena L50C1

Com a antena carregada com condensador de 1 pF a frequência de ressonância passou para 396,4 MHz e a largura de banda passou para 1,1 MHz sendo a antena, na ressonância, equivalente a um condensador de 29 pF em série com uma indutância de 9,9 nH. O fator de qualidade é de cerca de 360.

### Antena L50C2

Com a antena carregada com condensador de 2 pF a frequência de ressonância passou para 306,8 MHz e a largura de banda passou para 1,6 MHz sendo a antena, na ressonância, equivalente a um condensador de 26 pF em série com uma indutância de 10 nH. O fator de qualidade é de cerca de 190.

### Antena L50C2PTFR4

Com a antena carregada com condensador de 2 pF e a utilização de um plano de Terra, com 85 mm x 85 mm, colocado a 1,54 mm da face traseira de L1 com um isolamento separador em FR4, a frequência de ressonância passou para 358,2 MHz e a largura de banda passou para 1,2 MHz. O fator de qualidade é de cerca de 300.

Com o plano de Terra a frequência de ressonância sobe, como era esperado, a antena deixa de radiar para trás e o fator de qualidade subiu.



L50C2PTFR4

### **Antena L50C8**

Com a antena carregada com condensador de 8 pF a frequência de ressonância passou para 181 MHz.

### **Antena L50C8PTFR4**

Com a antena carregada com condensador de 8 pF e o plano de Terra FR4, a frequência de ressonância passou para 232 MHz.

### **Antena L50 – Conclusão**

Com a antena L50 e uma capacidade variável entre 0,5 pF e 10 pF é possível cobrir a banda de 200 a 600 MHz. Para realizar esta capacidade poderá ser usado um *varicap* para micro-ondas, controlado por tensão de 0 a 5 V DC, como, por exemplo o modelo da Skyworks SMV2020-079LF. A sintonia da antena numa dada frequência poderá assim ser controlada em “tempo real” por um recetor que deseje receber uma determinada frequência com uma largura de banda da informação transmitida da ordem de 1 MHz. O fator de qualidade deste díodo está bem acima do fator de qualidade da antena ensaiada com condensadores de valores fixos, pelo que não degradará substancialmente o desempenho da antena. O valor elevado do fator de qualidade é muito importante porque está relacionado com o baixo ruído da antena o que facilitará com certeza o projeto de um amplificador de baixo ruído adaptado ao baixo ruído intrínseco da antena. No fim poderemos ensaiar esta antena relativamente a um dipolo dimensionado para a mesma frequência. Acresce que stae tio de antenas é mais sensível ao ruído magnético do que elétrico, vantagem que talvez possa ser mais importante em Terra do que no Espaço.

## **A antena L100**

A antena L100 é a que está indicada por 4 na Fig.2. Na antena L100, a espira L1 tem o diâmetro exterior de 100 mm e o diâmetro interior de 90 mm e está implantada nas duas faces de um substrato FR4 com 1.54 mm de espessura. AS duas faces estão ligadas através de furos com o diâmetro de 3 mm metalizados. A espira L2 tem 25 mm de diâmetro exterior e 22 mm de diâmetro interior e só existe na face frontal da antena.

Esta antena ultrapassa a dimensão limite de 85 mm x 85 mm que consideramos ser razoável para a área útil da antena numa face de um cubesat com 10 cm de aresta, pelo que faremos apenas algumas medidas para ganharmos alguma sensibilidade para o que nos espera na antena, mais pequena, que vamos fabricar.

Na sua versão original a antena está dotada de um condensador variável que permite realizar a sua sintonia numa gama de frequências de 67,6 MHz a 222 MHz. Esta banda passa para 94 MHz a 257 MHz quando se introduz um plano de Terra separado por um substrato isolador de fibra de vidro FR4.

### **Convivência de duas antenas L50 e L100 no mesmo substrato**

Este é ao aspeto que agora vamos estudar para podermos juntar as duas bandas de frequência numa antena com um único ponto de excitação.

## **Referências**

[1] - [http://www.k4vrc.com/uploads/1/0/1/5/10156032/small\\_transmitting\\_loop\\_antennas.pdf](http://www.k4vrc.com/uploads/1/0/1/5/10156032/small_transmitting_loop_antennas.pdf)

[2] - <https://miguelvaca.github.io/vk3cpu/magloop.html>

[3]- <https://www.66pacific.com/calculators/small-transmitting-loop-antenna-calculator.aspx>

[4] - <https://webclass.org/k5ijb/antennas/Small-magnetic-loop-K5IJB.htm>

[5]- R. Macedo, S. Cardoso, P. P. Freitas, J. Germano, and M. S. Piedade, "Hybrid antenna–magnetoresistive sensor for radio frequency field detection," *Journal of Applied Physics*, vol. 109, no. 7, p. 07E505, 2011.

[6]- R. Macedo, *Spintronic Nano Devices: Nanofabrication of sub-50nm Magnetic Tunnel Junctions and Self-Powered Hybrid Sensors*. PhD thesis, Instituto Superior Tecnico, 2011.

[7]- [Rafaela Ribeiro Spintronic Antennas for Energy Harvesting from Power Lines](#)