

ESTUDO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA NA LEVITAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Alex Pereira França – franca@cefet-rj.br

Alexandre Gonçalves Gerck – gerck@cefet-tj.br

Carlos Alexandre Pontes Pizzino – pizzino@cefet-rj.br

Marlos Ferreira Martins - marlosfmartins@yahoo.com.br

Paulo Lucio da Silva Aquino – aquino@cefet-rj.br

Centro Federal de Ensino Tecnológico Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ
Av. Maracanã, 229 – Maracanã
20271-110 - Rio de Janeiro - Rio de Janeiro

Resumo: Este trabalho trata do estudo dos efeitos da variação da frequência na levitação eletromagnética. Foi construído um modelo acadêmico para levitação de uma chapa de alumínio, utilizando um inversor de frequência e um conjunto de bobinas. O inversor utilizado foi desenvolvido para total flexibilidade, onde foi possível fazer várias medições com diversas formas de ondas e frequências variadas. Este inversor é composto por três partes principais: módulo de alimentação, módulo do microcontrolador, módulo de chaveamento. O diferencial deste inversor é que o módulo de potência tem a capacidade de fornecer altas correntes e uma alta velocidade de chaveamento utilizado para comutação do MOSFET. São analisados circuitos monofásicos e trifásicos, variando assim a topologia do conjunto de bobinas. Considerando o crescimento da eletrônica de potência e os estudos feitos sobre a levitação eletromagnética, este trabalho permite consolidar os conhecimentos dos efeitos dos campos eletromagnéticos sobre materiais paramagnéticos em uma aplicação didaticamente atraente.

Palavras-Chave: Levitação eletromagnética, inversor de frequência

1. INTRODUÇÃO

A levitação eletromagnética é um tema atualmente bem comentado devido aos projetos dos trens de alta velocidade, como o Maglev, que funcionam por levitação. Existem duas formas para se obter a levitação; por atração e por repulsão, neste trabalho nos concentramos na levitação eletromagnética por repulsão.

A grande provocação para realizar este trabalho é o desafio do tema, onde apenas neste se concentra as mais diversas teorias da engenharia.

2. TEORIA FUNDAMENTAL

As leis de Maxwell podem ser simplificadas para facilitar os cálculos envolvidos já que as frequências envolvidas são baixas variando de 0 a 1 kHz, utilizaremos em especial a seguinte equação:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

onde

B = indução magnética;
 E = campo elétrico e
 t = tempo

Integrando a “equação (1)” em relação à área S

$$\iint (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{s} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

Aplicando o teorema de Stokes em 2

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (3)$$

como a tensão (V) é igual a integral do produto interno do campo elétrico (\vec{E}) pelo deslocamento (l)

$$V = \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

podemos reescrever (3) da seguinte forma :

$$V = - \frac{\partial \iint \vec{B} \cdot d\vec{s}}{\partial t} \quad (4)$$

e o fluxo magnético (Ψ_m) é igual a integral da indução magnética (\vec{B})
 $\Psi_m = \iint \vec{B} \cdot d\vec{s}$
 reescrevemos a “equação (4)”

$$V = -N \frac{d\Psi_m}{dt} \quad (5)$$

onde N é o fator de concatenação, ou seja, é o número de espiras.

Esta fórmula é o resultado dos trabalhos de Faraday e de Lenz, onde com aquela podemos explicar o funcionamento de máquinas e outros fenômenos da engenharia variantes no tempo.

Lei de Faraday: “A fem total induzida num circuito fechado é igual à taxa de variação em relação ao tempo do fluxo magnético total que enlaça o circuito”

Lei de Lenz: “a corrente induzida na espira é sempre num sentido tal que produz um fluxo que se opõe à variação da indução magnética”

Uma outra lei de fundamental importância para o eletromagnetismo é a Lei de Ampere, que podemos derivar de outra equação de Maxwell de forma semelhante ao que já foi exposto.

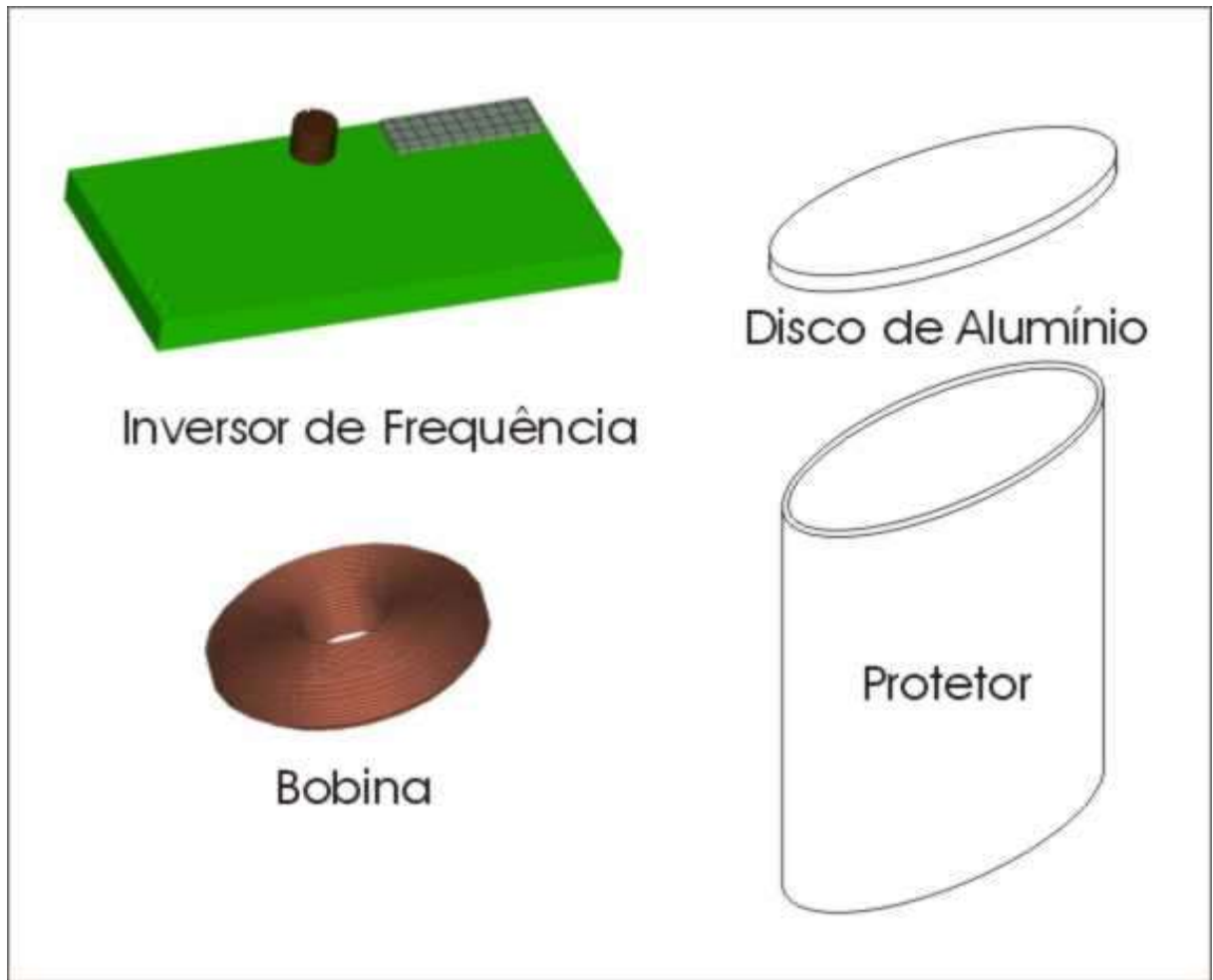
Lei de Ampere:

$$\oint_s \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (6)$$

3. MODELO PARA LEVITAÇÃO

O modelo é constituído pelo inversor de frequência, bobina, a chapa de alumínio (disco) e um suporte lateral.

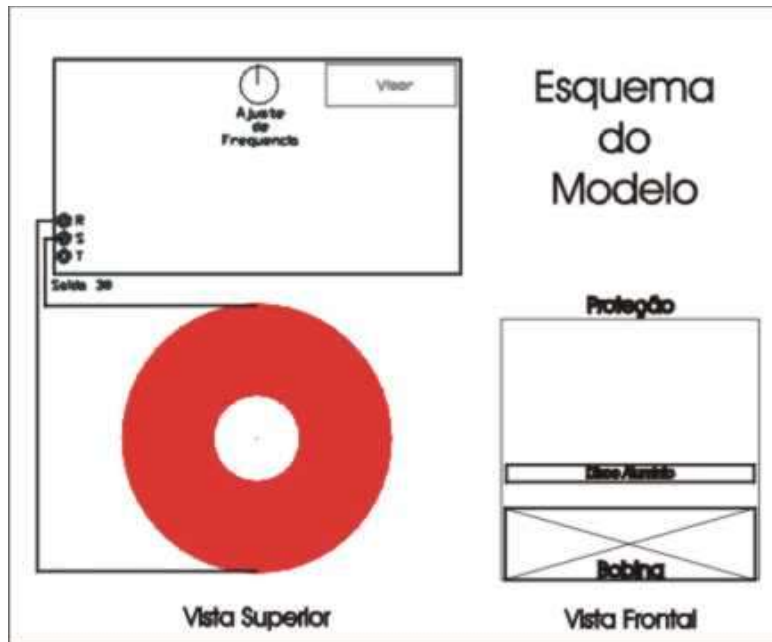
Figura 1 – Dispositivo de Levitação



Conectamos a bobina ao Inversor de Frequência, colocamos o disco de alumínio sobre a bobina e colocamos a proteção envolvendo os mesmos.

O inversor contém um ajuste de frequência e um visor para podermos visualiza-la no momento da utilização, a proteção é de material plástico transparente para podermos observar a levitação como na figura 2.

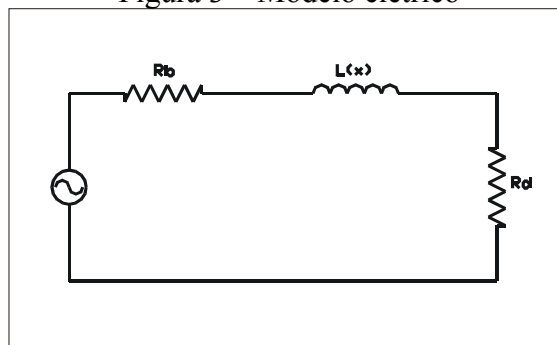
Figura 2 – Esquema de Ligação do Modelo



4. MODELO ELÉTRICO

O seguinte modelo reproduz os efeitos elétricos envolvidos no estudo.

Figura 3 – Modelo elétrico



onde

R_b = resistência da bobina

R_d = resistência do disco

L = indutância do sistema

As resistências envolvidas são pequenas em podendo ser desprezadas, a indutância (L) é dependente do tempo, sabemos através de experimentos que para este tipo de levitação o sistema é sub-amortecido com isso podemos definir a indutância da seguinte forma:

$$L(x) = L_0 - L_r \gamma^{-x} \quad (7)$$

onde

L_0 = é a auto indutância da bobina

L_r e γ = correspondem a amplitude do termo variante e a constante de decaimento da distância respectivamente, podem ser obtidos se L for medido.

Equacionando o circuito pela lei das malhas no tempo

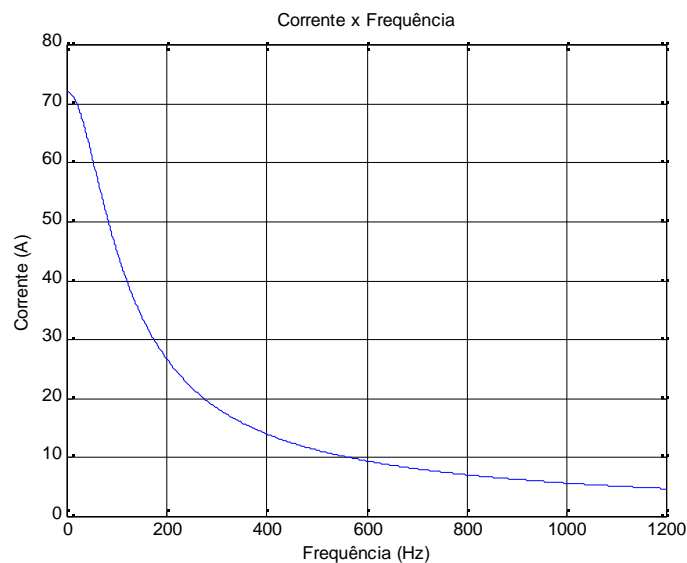
$$v_f(t) = (R_b + R_d) \cdot i(t) + L(x) \frac{di(t)}{dt} \quad (8)$$

desprezando as resistências e utilizando fasores e como a indutância L é dependente da distância (x) entre o disco e a bobina, teremos $\dot{V}_f \approx j\omega L(x) \dot{I}$ logo,

$$\dot{I} \approx \frac{\dot{V}_f}{j\omega(L_0 - L_r \gamma)} \quad (9)$$

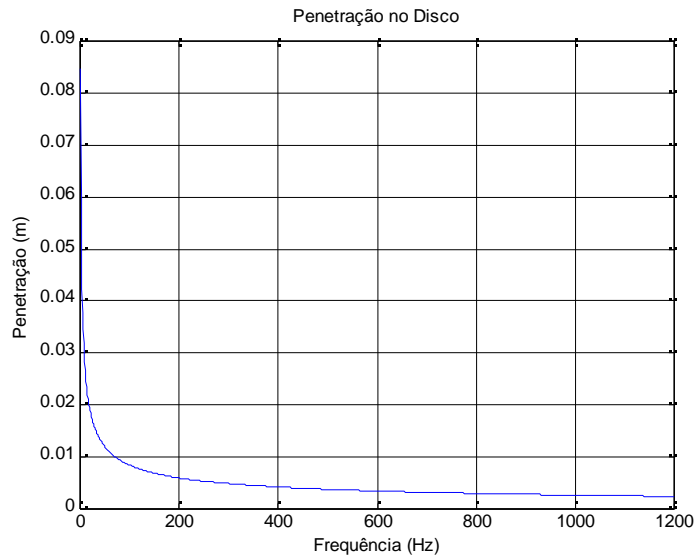
uma curva típica desta corrente esta mostrada na figura 4, a indutância total desta curva é aproximadamente 1mH, para valores muito maiores que este o sistema perde a sensibilidade pela frequência, e para valores menores as correntes envolvidas aumentam consideravelmente.

Figura 4 – Corrente Total



Uma outra consideração esta no fato de que os valores de L_r e γ , variam com a frequência, isto se deve pelo fato da penetração do campo no material condutor diminuir com o aumento da frequência, pela expressão $\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \epsilon}}$ é possível se calcular a profundidade de penetração (δ) do campo no disco de alumínio onde μ e ϵ são permeabilidade magnética e a permissividade elétrica do alumínio.

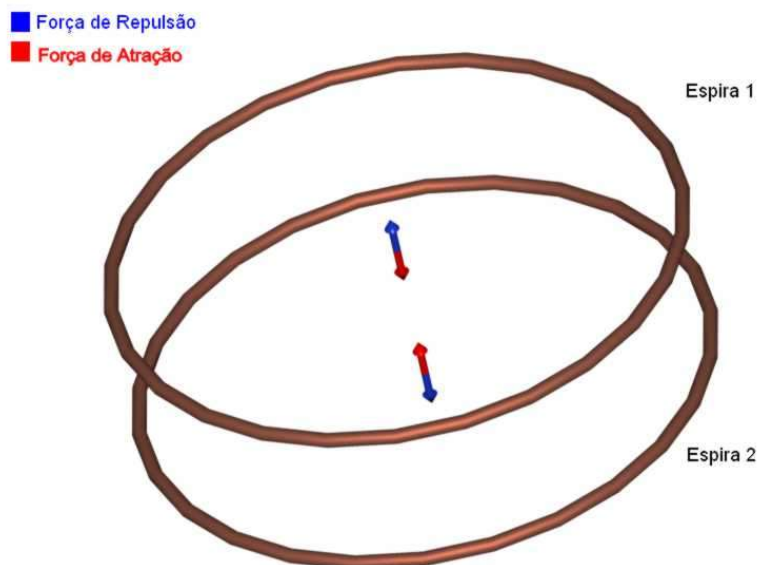
Figura 5 – Penetração do campo no disco de alumínio



5. INTERAÇÃO MAGNÉTICA

Duas espiras próximas percorridas por uma corrente elétrica interagem magneticamente, como em um transformador, considerando estas espiras alinhadas, envolvendo o mesmo eixo, podemos afirmar que a interação magnética produz uma força atrativa quando o sentido das correntes na espira 1 e na espira 2 forem do mesmo sentido, e a força será repulsiva quando o as correntes nas bobinas tiverem sentidos opostos.

Figura 6 – Duas espiras condutoras

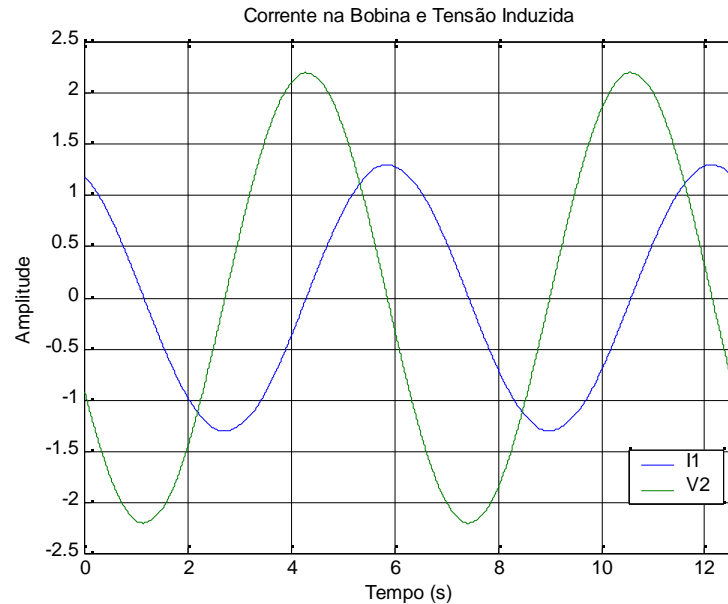


Ainda considerando as duas bobinas, onde na bobina 1 circula uma corrente que induz na bobina 2 uma tensão que por sua vez produz uma corrente que circula na bobina 2, estamos falando da lei de Faraday-Lenz.

No nosso caso em específico a bobina é como a espira 1 e o disco é como a bobina 2, notem que o disco poderia ser um simples anel, pois a corrente flui pelas bordas do condutor.

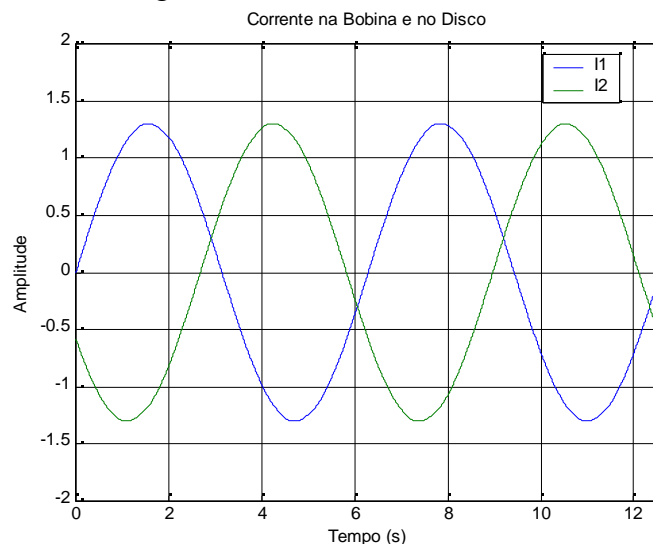
A bobina que é percorrida por uma corrente I_1 , que pode ser descrita como uma senóide, esta cria um fluxo magnético que varia senoidalmente em fase com I_1 e atravessa o disco de alumínio, devido a “equação (5)”, a tensão induzida no disco no disco de alumínio tem sinal inverso da derivada do fluxo magnético que o atravessa. Uma representação típica destas formas de onda podem são mostradas no gráfico ao lado.

Figura 7 – Corrente e Tensão



Uma tensão induzida (V_2) no disco produz uma corrente I_2 e se o disco fosse um condutor perfeito, então a defasagem seria máxima e I_2 estaria atrasada de V_2 de 90° , como podemos verificar pela seguinte ilustração.

Figura 8 – Corrente envolvidas



$$I_2 = \frac{V_2}{\sqrt{R_d^2 + X_d^2}} \angle \phi \quad (10)$$

onde

R_d = resistência do disco

X_d =reatância do disco

ϕ = ângulo de defasagem

Teríamos assim para nosso caso, a repulsão máxima, porém a resistência no disco existe, mesmo que pequena, isto faz com que a defasagem diminua e assim diminui a força de repulsão, note que a atração continua a existir, porém a resultante é repulsiva, até que a uma certa distância x da bobina, a força de repulsão se iguale ao peso do disco, ocorrendo em torno deste ponto uma oscilação devido a natureza alternada da onda, a fórmula da frequência é dada por :

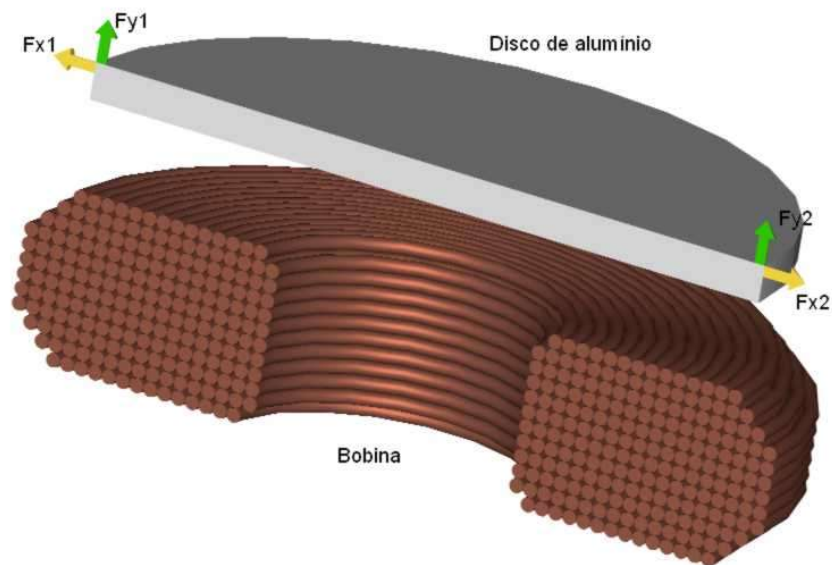
$$f \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\gamma}} \quad (11)$$

onde

g é a aceleração da gravidade

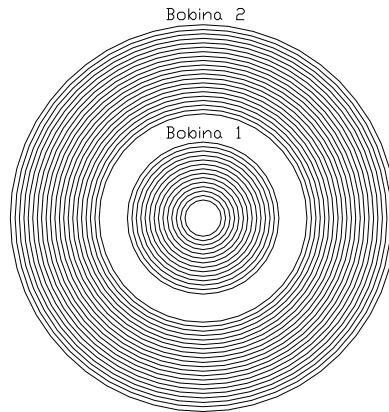
6. FORÇAS ENVOLVIDAS

Figura 9 –Forças atuantes no disco



A interação entre a bobina e o disco cria uma força resultante F_r , que pode ser decomposta em F_{xi} e F_{yi} , as forças F_{xi} e F_{xi} tem seus sentidos opostos e seus módulos são iguais somente se a distância entre estas e as correntes na bobina forem iguais, para isto é necessário que o disco e a bobina estejam alinhados sob o mesmo eixo. Na prática duas coisas impedem este funcionamento, o primeiro é a própria centralização do disco, que devido até mesmo a oscilação da levitação, provoca um deslocamento de eixo, outro é que o disco e a bobina necessitam serem simétricos, ou seja, basicamente suas vistas superiores devem projetar uma circunferência perfeita, para resolver este problema existem dois modos de pouca complexidade e, o primeiro é colocarmos uma outra bobina ao envolvendo a primeira bobina, de modo que a corrente nesta esteja defasada da bobina 1, o outro meio é anular as forças laterais resultantes com uma proteção mecânica, que foi a nossa escolha devido a extrema simplicidade e seu funcionamento.

Figura 10 – Bobinas concêntricas



7. O INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Muitas das cargas trifásicas necessitam de uma fonte de tensão variável com uma frequência igualmente variável. Uma aplicação bastante comum é o caso dos motores AC em que a velocidade do rotor é controlada primariamente pela frequência que lhe é fornecida e em que o fluxo do estator é controlado através da tensão que também lhe é fornecido.

Para aplicações deste tipo, as especificações de potência situam-se entre frações de kilowatt, até vários megawatts. Geralmente, opta-se por obter a potência necessária através de uma fonte DC e, em seguida, procede-se à sua conversão num sinal AC trifásico.

A fonte DC de amplitude constante é, por sua vez, obtida da rede pública através da sua retificação, ou alternativamente, através de baterias. A conversão da potência DC para uma potência trifásica AC, é obtida exclusivamente através da comutação. Semicondutores eletrônicos de potência efetuam comutações repetitivas (a uma frequência relativamente alta) que interligam os dois terminais DC às três fases de um motor AC. O trânsito de potência em cada fase controlado através do ciclo de trabalho dos respectivos interruptores. As ondas senoidais nas correntes são obtidas variando o ciclo de trabalho destes interruptores de uma forma senoidal com o tempo.

Resumidamente, a função de um inversor de frequência é controlar uma carga trifásica, sendo capaz de variar a frequência e amplitude de um sinal senoidal.

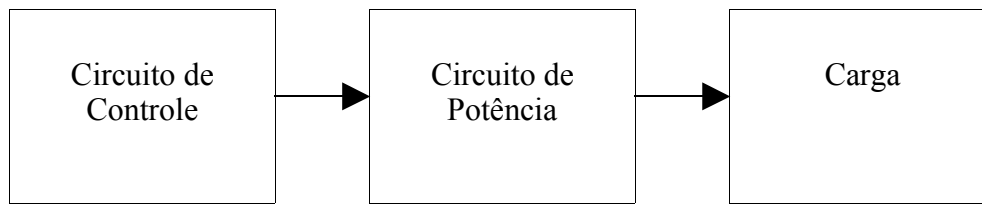
O Circuito de Controle Proposto

Utilizou-se neste projeto o microcontrolador C164CI, da Infineon. O microcontrolador é responsável pela geração das três ondas senoidais defasadas de 120° entre si, a partir da geração da onda triangular de 10 kHz e das comparações com valores senoidais, feitas por um periférico desse microcontrolador chamado CAPCOM (captura e comparação).

Desse modo o circuito de controle do inversor resume-se ao microcontrolador da Infineon, com seus circuitos periféricos e um potenciômetro que dita a referência de frequência. Os sinais PWM gerados deverão passar por um driver, que proverá toda a proteção de chaveamento (dead time – tempo morto) e o isolamento necessário entre os circuitos de potência e controle.

A programação foi utilizada a linguagem C, e tanto a compilação quanto à transferência dos programas ao microcontrolador são feitos por um software chamado Keil μ Vision2 através de uma placa conectada à saída serial do PC.

Figura 11 – Diagrama em bloco do inversor



8. CONCLUSÃO

Com o avanço dos materiais supercondutores, podemos esperar avanços significativos nesta área, as vantagens obtidas devido ao movimento sem atrito são evidentes, este trabalho mostrou que podemos variar as forças envolvidas através da variação da frequência, em breve este simples estudo pode se tornar um elegante método para o controle das forças na levitação eletromagnética. Um exemplo interessante seria de um elevador que poderia ser controlado pela frequência usando como um atuador, o motor linear de indução.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HALL, J. Forces on the jumping ring. *The Physics Teacher*, vol.35, p. 80-83, 1997.
- QUINTON, A. R. The ac repulsion demonstration of Elihu Thomson. *The Physics Teacher*, v.17, p. 40-42, 1972.
- SUMNER, D. J. E THAKKAR, A. K. Experiments with a jumping ring' apparatus. *Physics Education*, UK, v.7, n. 4, p. 238-242, 1972.
- Silveira, Fernando L. Explicação Qualitativa do "Anel de Thomson" Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, no. 1, Março, o, 2003

10. ABSTRACT

STUDY OF THE FREQUENCY VARIATION IN THE ELECTROMAGNETICAL LEVITATION

This paper is a research about the effects of the frequency variation in the electromagnetic levitation. It was built an academic model for the levitation of an aluminum plate using a frequency inverter and a set of coils. The frequency inverter used was developed for total flexibility, where it was possible to do some measures with different waveforms and frequencies. This inverter was built in three main parts: the power supply module, the micro controller module and the power-switching module. The main characteristic of the inverter is that the power-switching module has the capacity of supplying high electrical currents with a high switching speed used for the Mosfet commutation. In this paper it is analyzed single-phase and three-phases circuits, changing the coils topology. Considering the power electronics' growing and the electromagnetic levitation studies, this paper allow to consolidate the knowledge about magnetic field effects in paramagnetic materials in a attractive didactic application

key words: electromagnetic levitation, frequency inverter