

Projeto de um gerador de ímãs permanentes de fluxo axial sem núcleo de ferro com arranjo Halbach

MATHEUS NARDINI*, ROMEU ABRAHÃO PEREIRA**, LEANDRO AURELIANO DA SILVA***

Os geradores elétricos convencionais utilizam núcleos ferromagnéticos com alta permeabilidade magnética, a qual além de concentrar o fluxo no núcleo, guia através do vazio de ar, onde se situa o estator, eliminando perdas por histerese e correntes parasitas, apresentando torque de cogging nulo. No arranjo Halbach, a ausência do núcleo de ferromagnético é compensada pela alta densidade de fluxo magnético, devido a sua focalização no vazio de ar. Este trabalho apresenta o projeto de uma máquina de ímãs permanentes com fluxo axial, utilizando a configuração dos ímãs no arranjo Halbach, com os parâmetros de potência, velocidade de giro, dimensões geométricas do rotor e do estator com suas topologias de montagens, com o objetivo futuro de ser construído e testado, para uso em geração eólica e térmica.

INTRODUÇÃO
O alto desempenho dos ímãs de terras raras, tais como os de neodímio e samário cobalto, os quais fornecem fortes campos de magnetização, tem sido empregados em projetos e construções de máquinas de fluxo axial e radial de geradores elétricos, nas aplicações industriais e de geração a partir de fontes renováveis.

Os geradores síncronos axiais de ímãs permanentes (AFPM) geram energia de qualidade, com baixas distorções harmônicas, e permitem escolhas de topologias múltiplas, facilitando suas construções, e tornam possível obter-se mais eficiência e melhor desempenho de geração.

Este trabalho apresenta uma estrutura de máquina baseada no chamado arranjo Halbach, o qual tem um padrão de magnetização aplicada à estrutura planar do rotor, de modo a concentrar o fluxo magnético no espaço de um lado do mesmo, gerando campo magnético mais forte quando comparado ao arranjo convencional, dispensando o uso de material ferromagnético no rotor e, portanto, diminuindo as perdas que ocorrem no ferro e com densidade de fluxo magnético mais senoidal.

ARRANJO HALBACH

Tudo começou no ano de 1973 quando o efeito de “fluxo de um lado” foi descoberto e sua fundamentação física teórica foi apresentada por John Mallison, mostrando a existência do padrão de uma nova clas-

se de magnetização existente na estrutura planar, com a propriedade de que todo o fluxo magnético emana de uma superfície, com nenhum fluxo deixando o outro lado da mesma, como mostrado na figura 1, em (a) com fluxo de magnetização longitudinal, em (b) com fluxo transversal e, em (c) o fluxo combinado dos dois anteriores, MALLISON (1973).

A descrição do padrão de magnetização segundo Mallison, resulta da superposição de M_x e M_y :

$$M_x = \hat{M} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \text{ e } M_y = \hat{M} \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (1)$$

Sendo: λ comprimento de onda com número de ímãs igual a quatro, \hat{M} a amplitude de magnetização, h_m a altura do ímã e l_m o seu comprimento como mostrado na figura 2.

A aplicação da auto-blindagem magnética apresentada por Mallison foi utilizada por Klaus Halbach em 1980 e, posteriormente em 1984, apresentando a nova configuração de ímãs permanentes, a qual se tornou conhecida como arranjo Halbach, como ilustrado na figura 3, com os componentes de arranjo radial (a) e axial (b), com quatro ímãs cada, que juntos se superpõem resultando a distribuição de fluxo magnético de arranjo Halbach de oito ímãs (c).

TOPOLOGIA DO ARRANJO HALBACH PARA O GERADOR

As partes eletromecânicas principais do gerador de ímãs permanentes com fluxo axial, é composto por um estator contendo a

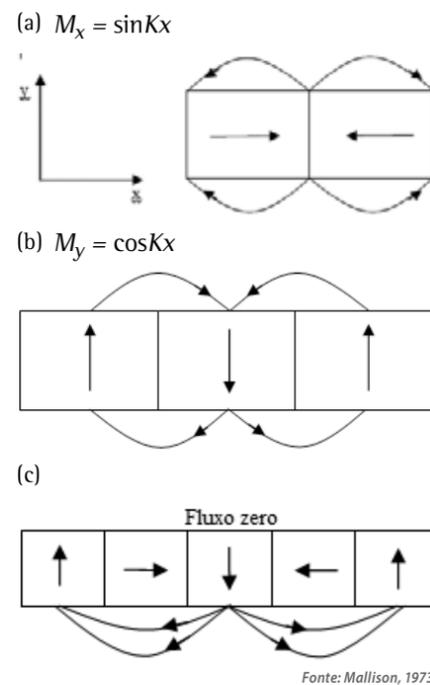


Figura 1 - Fluxo de magnetização segundo Mallison (1973)

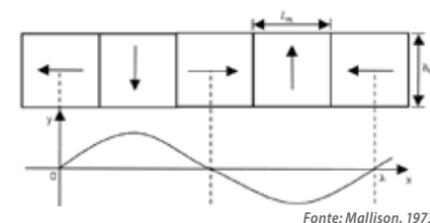


Figura 2 - Arranjo de quatro ímãs por comprimento de onda

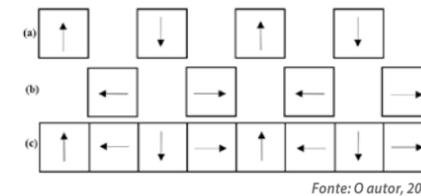


Figura 3 - (a) componente radial, (b) componente axial, (c) arranjo Halbach

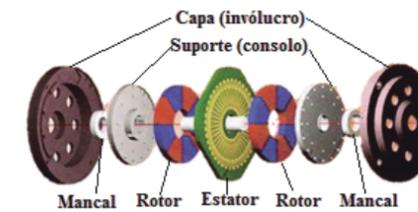
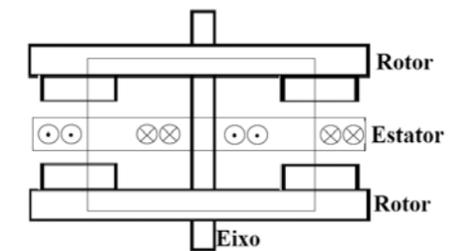
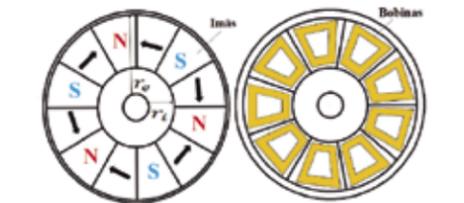


Figura 4 - Estrutura básica da máquina em vista explodida



(a) Gerador axial



(b) Rotor (c) Estator

Figura 5 - Estrutura da máquina (a) gerador axial, (b) rotor com ímãs permanentes, (c) estator com armadura e bobinas

armadura, e dois rotores de ímãs em configuração de arranjo Halbach como mostrado na figura 4.

Cada rotor contém doze ímãs de neodímio (NdFeB) grade 42 com densidade de fluxo magnético $B_r = 1,48T$, formato trapezoidal. O número de polos relacionam-se com a frequência elétrica da voltagem gerada pela rotação (Grieras – 2004):

$$f = \frac{2p \cdot n_s}{120} \quad (2)$$

em que:
 f frequência em Hertz
 $2p$ número de polos
 n_s velocidade de giro (rpm)

Adotando $2p=12$, o número de bobinas no estator é: CARTER (1967)

$$N = \frac{3}{4} \cdot 2p = 9 \text{ bobinas} \quad (3)$$

Com três fases na geração, tem-se três bobinas por fase, com 240° de mudança de fase entre bobinas adjacentes.

O arranjo construtivo do gerador apresenta a estrutura mostrada na figura 5, com os dois discos rotores idênticos, e o disco de estator. Os ímãs do rotor são assentados em discos de alumínio ou de material não-magnético e fixados ao eixo de rotação. A armadura do estator é composta por bobinas trapezoidais envolvidas em resina ou em material plástico de grande resistência mecânica.

No rotor, r_i e r_s são os raios interno e externo, respectivamente.

O arranjo Halbach de duplo rotor é mostrado na figura 6, sendo g_{ag} a distância entre os dois arranjos, h_m a altura dos ímãs, t_w a espessura axial da armadura, a g o espaço livre do vazio de ar, g_t a espessura total.

Segundo Jacek F. Gieras et al (2004), o modelo de circuito magnético para um período elétrico e uma metade do motor é função da relutância do vazio de ar, da força

magnetomotriz do estator e do fluxo através do circuito magnético, de modo que o fluxo magnético excitado pelos ímãs permanentes e por polo do gerador é:

$$\phi_f - \int_{r_i}^{r_e} \alpha_i B_{mg} \frac{2\pi r dr}{2p} = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{2p} (r_e^2 - r_i^2) \quad (4)$$

em que:

α_i a razão da densidade média do fluxo, B_m e o valor de pico B_{mg} no vazio de ar, $2p$ número de polos, r_i e r_e são os raios interno e externo do rotor, respectivamente.

Se a razão $\frac{r_i}{r_e} = K_d$, a (4) se torna:

$$\phi_f - \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{8p} (2r_e)^2 (1 - K_d^2) \quad (5)$$

O vazio de ar equivalente na figura (6) é:

$$g_t = 2(g + 0,5t_w + \frac{h_m}{\mu_{ret}}) \quad (6)$$

μ_{ret} permeabilidade relativa de retração

Para ímãs de neodímio (NdFeB) o valor de μ_{ret} situa-se no intervalo de 1,0 a 1,2 - DUANE HANSELMAN (2006).

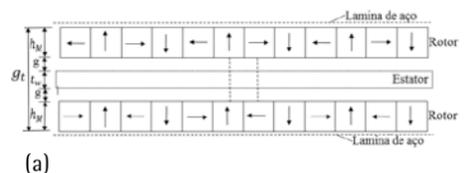
A força F sobre um fio de comprimento L , percorrido por uma corrente I em um campo magnético B é:

$$F = BIL \quad (7)$$

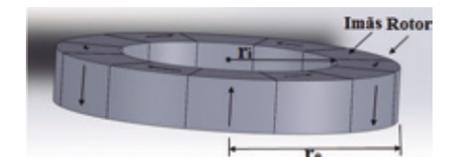
Com as direções de B e I perpendiculares entre si. Se a densidade de corrente é K_l , em Ampere/metro, a força sobre o condutor se relaciona com a tensão de cisalhamento σ do vazio de ar pela relação:

$$\sigma = \frac{F}{A_{rotor}} = \frac{BIL}{l \cdot w} = \frac{BI}{w} = B_{mg} \cdot K_l \quad (8)$$

Sendo w o comprimento linear médio em torno do vazio de ar e B_{mg} a sua densidade média de fluxo por polo. Segundo Jacek F. Gieras (2004) e Miller (1989), para uma



(a)



(b)

Figura 6 - (a) arranjo Halbach planar da estrutura, (b) arranjo espacial do rotor com ímãs permanentes em arranjo Halbach

distribuição de densidade de fluxo senoidal, pode-se tomar ou usar:

$$B = \frac{2B_{mg}}{\pi} \quad (9)$$

Considerando o valor de $B=0,5T$ e $K_l=55.000$, $\frac{A}{m}$, o valor de σ deve situar-se no intervalo de 13,75 KPa a 27,5 KPa segundo Miller (1989).

Para a determinação das dimensões da máquina os parâmetros de projeto são as constantes na tabela 1.

Para máquinas de fluxo axial, a tensão de cisalhamento médio σ no vazio de ar, segundo Miller é:

$$\sigma = \frac{T}{A_{rotor} \cdot r_m} \quad (10)$$

Tabela 1 - Parâmetros de projeto da máquina

Parâmetros	Valor
Potência gerada	500 W
Tensão de fase	60 V
Torque	7,95 N.m
Velocidade	600 rpm
Corrente	10 A
Polos	12
Ligação	Estrela (Y)

Fonte: O autor, 2016.

Sendo T o torque de projeto, A_{rotor} a área ativa da superfície de interação da corrente do estator com o fluxo magnético, r_m o raio médio do rotor, a superfície ativa é:

$$A_{rotor} = (r_e^2 - r_i^2) \cdot \pi \quad (11)$$

o raio médio é:

$$r_m = \frac{r_e + r_i}{2} \quad (12)$$

Com $K_r = \frac{r_i}{r_e}$ o torque é:

$$T = \frac{\pi \sigma}{2} (1 - K_r^2) (1 - K_r) r_e^2 \quad (13)$$

da qual se tem:

$$r_e = \left[\frac{2T}{\pi \cdot \sigma \cdot (1 - K_r^2)(1 - K_r)} \right]^{1/3} \quad (14)$$

O valor de K_r deve situar-se no intervalo de 0,57 a 0,63 (Miller), (Santiago), de modo a se ter eficiência da máquina superior a 0,95.

Considerando os limites para σ e usando a equação (12) com $K_r = 0,6$ e $\sigma = 18,77$ KPa os raios do rotor são $r_e = 0,064$ m e $r_i = 0,039$ m.

No arranjo dos ímãs no rotor, cada ímã tem um arco que subtende um ângulo de 30°, com as dimensões mostradas na figura 7, com a metade dos ímãs magnetizados na direção axial e a outra metade, na direção circunferencial. Oliver Winter et.al. (2012) estabeleceram as equações teóricas para a determinação da medida do vazio de ar em função da densidade de fluxo, e sua dependência com a espessura dos ímãs (h_m) em arranjos Halbach que utilizam ímãs de geometria trapezoidal.

Para a determinação de h_m deve dispor da espessura da bobina t_w e da distância correspondente aos dois arranjos g_t .

O estator é composto por nove bobinas,

cada uma ocupando um setor circular de arco subtendendo 40°, de formato trapezoidal como ilustrado na figura 5, com área de $9 \times 10^{-4} m^2$ cada. O número de espiras em cada bobina é dada por, CARTER (1967):

$$E_\phi = N_\phi \cdot A_{bobina} \cdot \frac{dB}{dt} \quad (15)$$

em que: E_ϕ é a força eletromotriz por fase com a densidade do fluxo dada por:

$$B = B_m \cdot \sin(\omega t) \quad (16)$$

resultando:

$$E_\phi = N_\phi \cdot A_{bobina} \cdot \omega \cdot B_m \cdot \cos(\omega t) \quad (17)$$

e,

$$N_\phi = \frac{E_\phi}{A_{bobina} \cdot \omega \cdot B_m} \quad (18)$$

Com B_m dado pela Equação (9), $\omega = 337$ rad/s, e $E_\phi = 60V$, resultam 227 espiras para três bobinas por fase. Adota-se 76 espiras por bobina de modo que sua espessura sera $t_w = 0,009m$, utilizando fio de cobre de diâmetro 1,0mm tendo em consideração os interstícios e as pequenas espessuras de vazios entre os valores das espiras. Pela equação (6) a espessura efetiva do vazio no núcleo do gerador é $g = 0,006$ m.

Cada bobina apresenta resistência de 0,34 Ω e indutância: KLAUS (1980)

$$L_{bobina} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A_{bobina}}{l_{bobina}} \quad (19)$$

em que: $\mu_0 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} N \cdot A^{-2}$ é a permeabilidade magnética do vácuo, obtendo-se: $L = 3,84$ mH, com reatância $X_l = 1,45\Omega$.

O circuito equivalente é mostrado na figura 8.

A corrente em cada bobina é:

$$I = \frac{E_\phi}{\sqrt{(R + R_\phi)^2 + (X_l \phi)^2}} \quad (20)$$

sendo: $R_\phi = 3 \cdot R_{bobina} = 1,02\Omega$

A reatância de fase é:

$$X_{l\phi} = 3 \cdot X_{bobina} = 4,35\Omega \quad (21)$$

A potência gerada é:

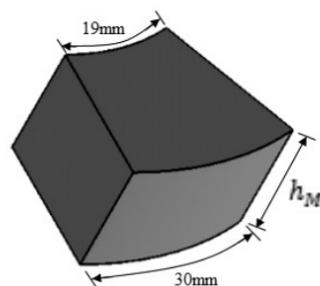
$$P = 3 \cdot 60 \cdot 1 = 180W \quad (22)$$

A perda no cobre é:

$$P_{cu} = N_{bobina} \cdot I^2 \cdot R_{bobina} \quad (23)$$

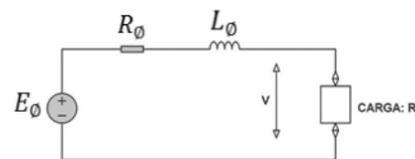
A eficiência do gerador é:

$$\eta = \frac{P}{P + P_{cu}} \cdot 100\% \quad (24)$$



Fonte: O autor, 2016.

Figura 7 - Imã de um setor do disco do rotor



Fonte: O autor, 2016.

Figura 8 - Circuito equivalente do gerador

CONCLUSÃO

O projeto apresentado neste trabalho refere-se a um gerador de fluxo axial de duplo rotor, sem núcleo de ferro no arranjo Halbach, o qual concentra o fluxo magnético no vazio da máquina, entre os rotores, propiciando ganho de eficiência e melhor desempenho na geração de energia elétrica nas aplicações em turbinas eólicas e pequenas plantas de potência com geração térmica. A metodologia de projeto utilizada na determinação dos parâmetros da máquina permite derivar alternativas em valores de potência, voltagem e um amplo intervalo de velocidade de operação, de modo a se construir geradores de eletricidade até a ordem de 5KW.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CARTER, W. - "The Electromagnetic Field em its Engineering Aspects", Longmans, 1967.
 [2] DUANE, HANSELMAN - "Brushless Permanent Magnet Motor Design", 2ed Magna Publishing, 2006.
 [3] ESTMAN, MILLER T. JONH - "Brushless Permanent - Magnet and Reluctance Motor Drives". Oxford Science Publications - Clarendon Press, 1989.
 [4] GIERAS, JACEK F.; WANG, RONG J.; KAMPER, MAARTEN J. - "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines". 1st ed. Springer - Kluwer - Dordrecht - Boston - London, 2004.
 [5] HALBACH, KLAUS - Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. Nuclear instruments and methods, v. 169, n. 1, p. 1-10, 1980.
 [6] JOHN, MALLISON - "One-sided fluxes - A magnetic curiosity." IEEE Transactions on magnetics, vol. 9, no 4, pp 678-682, Dec. 1973.
 [7] SANTIAGO, J.; BERNCHOFF H. - "Comparison Between Axial and radial flux PM coreless machines for flywheel e energy Storage". J. Electrical Systems, 6-2, 2010.
 [8] WINTER, OLIVER; KRAL, CHRISTIAN; SCHMIDT, ERICH - Design study of magnet shapes for axial Halbach arrays using 3D finite element analyses. In: Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on. IEEE, 2012. p. 2660-2665.

* **Matheus Nardini**, Faculdade de Talentos

Humanos - FACTHUS, Uberaba (MG)

E-mail: matheus_nardini@hotmail.com

** **Romeu Abrahão Pereira**, Faculdade de Talentos

Humanos - FACTHUS, Uberaba (MG), Centro Brasileiro

de Pesquisas Físicas - CBPF - MCTIC, Rio de Janeiro (RJ)

E-mail: romeuabrahao@yahoo.com.br

*** **Leandro Aureliano da Silva**, Faculdade de

Talentos Humanos - FACTHUS, Uberaba (MG)

E-mail: lasilva@facthus.edu.br

Inovações metroviárias



NESTOR SOARES TUPINAMBÁ
 é engenheiro, mestre em urbanismo e
 consultor de transporte
 E-mail: nstupunamba@uol.com.br

Participando da 23ª Semana de Engenharia da AE-AMESP (19 a 22 de setembro), lembrei-me de um acontecimento curioso que ocorreu comigo em novembro de 2005.

Nosso gerente, o estimado Sérgio Salvadori, disse-nos que tínhamos uma missão urgente provocada por vários telefonemas vindos do "alto ao baixo clero" (eu, claro!). Do secretário ao presidente do Metrô até nosso gerente. Ofícios viriam depois. Só sabíamos que seria no novo edifício da UNIP, na Rua Vergueiro e tratava-se de inovações tecnológicas. Era a EXPOUNI com sede em Toronto, Canadá.

Eu, Nelson Nunes e o José Henrique Freitas (perdoem-me se esqueci de alguém...), formaríamos a equipe do Metrô.

Combinamos em rápida reunião o que contaríamos como novidades tecnológicas no Metrô usando o recém-acabado projeto básico da Linha 4-Amarela.

Trens sem operadores (driverless, que impressionam os usuários da Via Amarela embora também tenhamos nosso driverless já que nossos trens rodam sozinhos e só exigem ação do operador frente a alguma anomalia), portas de plataforma que evitariam quedas nas vias, estações inteligentes (iluminação, escadas rolantes que só funcionariam à chegada do usuário e o "mágico" CBTC - sinalização eletrônica que permite trens trafegando a altas velocidades e mais próximos uns dos outros).

Também os trens com bitola menor de 1,435m, com salão contínuo etc.

E lá fomos nós intrigados com o horário tão preciso: "às 13h40 vocês entrarão...".

Ao nos receberem conduziram-nos para a parte de trás do enorme palco. Ouvíamos um médico expondo as inovações da medicina: cola de ossos, cura de feridas pela crioterapia e outros.

O médico termina seu discurso e somos levados ao palco. Uma profusão de câmeras filmadoras, iluminação etc., mas um enorme auditório na penumbra e vazio. Vazio! Sentamos-nos em uma grande mesa sem deixar de olhar para aquelas cadeiras, 100% vazias. Ninguém sentado!

Sussurrei para o nosso guia e ele disse-nos, surpreso, que havia uma transmissão simultânea para todo o planeta, centrada em Toronto.

E que agíssemos como se milhares de espectadores nos vissem!

Ficamos quase paralisados, estupefatos (palavra estranha, mas que se encaixa no momento), com aquela "vacuidade".

"Não se traiam, o mundo lhes assiste, agora", disse nosso anfitrião.

Disfarçando a frustração recuperamos a calma, e o "aplomb", e começamos a abordar nosso tema.

Tentei até algumas gracinhas, uns trocadilhos, mas não houve risos, apenas aquele cenário vazio e silencioso. Senti-me um cinico já que a vontade era sair por baixo das cortinas... Cheio de dúvidas.

Verdade que expectadores nos assistiam? Onde, quantos? Havia interesse em nossas novidades? Seriam novidades para eles, fariam perguntas? Havia profissionais de transportes públicos?

Assim falamos e falamos... E quem pensa que é fácil encarar uma plateia sem olhares engana-se.

E continuando nossa "interpretação", terminamos, agradecemos e nos colocamos à disposição para perguntas. Que não existiram! Nem aplausos!

Faltaram calor humano e 1 000 rostos vendo nossa apresentação. Lembrei-me do livro de George Orwell, o lendário 1984! Escrito em 1948, Orwell inverteu para o que ele achou ser um longo futuro!

E lá estávamos nós... vigiados pelo "Grande Olho" que tudo vê e tudo delata.

Hoje somos a "Sociedade do Espetáculo". Valorizamos o show e, portanto, tudo tem que ser documentado e exibido.

No mundo inteiro temos milhões de "artefatos documentantes". São drones, câmeras de ruas, edifícios, fotografando, filmando etc. Depois somos exibidos nas desgastadas "pegadinhas" onde o lado cômico e patético de nossas vidas é exibido mundialmente nas TVs. Também criminosos, corruptos e assaltantes são pegos e crimes desvendados.

Somos discretos? Nem um pouco. O Google prepara um algoritmo que detecta por onde o usuário trafega, por quanto tempo etc.

E avalia você. Se eufórico, se gosta de roupas caras, se quer ir a um restaurante chic, se está deprimido etc.

E, em seguida, faz as sugestões de modo tão ingênuo, quanto inocente possa parecer!

Está triste? Vá ao "Picanha de Prata", reforce seu ego.

"Sente-se macabúzio? Compre roupas novas e saia exibindo-as... Vão gostar mais de você assim...".

"Tudo é mesmice. Não aguenta mais olhar para o seu chefe? Embarque num cruzeiro por mares nunca dantes navegados e volte "novo"...

Que espionagem terrível e invasora! Tenho um amigo que foi colocado numa lista de atenção de vários consulados pelos e-mails trocados aqui para Foz do Iguaçu, para nós belas cataratas, mas para outros a "Tríplice Fronteira", onde circulariam agentes do Estado Islâmico e outros que tais. Pior, se você se chamar Fuad, Hissam e trocar mensagens com Salims, Mohameds etc. Estará sob uma vigilância até que fiquem cansados de ver a tediosa vida de um engenheiro em São Paulo procurando emprego...

Um simples, e aparentemente inofensivo algoritmo - bastante usado na engenharia -, traindo engenheiros.

E lembrei-me que quando saí da minha Brotas, com 14 anos, mi-grando para cidades grandes, sentia muita falta do torrão natal, mas aliviava-me ter saído da mira do olhar maldoso das comadres locais.

Alegrava-me ficar incógnito em Sampa, andar sem ser reconhecido, fofocado etc.

Será que hoje, em Brotas, reina também o olho do "Grande Irmão" e, associado ao das comadres, dedando as pessoas? 1984 perde, caro George Orwell!