



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) PI 0924419-0 B1**



**(22) Data do Depósito: 12/03/2009**

**(45) Data de Concessão: 07/04/2020**

---

**(54) Título:** ROTOR PARA UMA MÁQUINA DE RELUTÂNCIA SÍNCRONA

**(51) Int.Cl.:** H02K 19/10; H02K 1/24.

**(73) Titular(es):** ABB RESEARCH LTD..

**(72) Inventor(es):** REZA RAJABI MOGHADDAM.

**(86) Pedido PCT:** PCT EP2009052930 de 12/03/2009

**(87) Publicação PCT:** WO 2010/102671 de 16/09/2010

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 09/09/2011

**(57) Resumo:** ROTOR PARA UMA MÁQUINA DE RELUTÂNCIA SÍNCRONA. A presente invenção refere-se a um rotor (30) para uma máquina de relutância síncrona, em que um comportamento de ondulação de torque da máquina é otimizado alterando a geometria de barreiras isolantes (4) do rotor (30). Um ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  (12) é utilizado como uma variável de projeto ao invés de ajustar o seu valor igual ao restante dos passos de fenda de rotor ou ligar o seu valor ao passo de fenda de estator. O rotor (30) resultante tem um passo de fenda não regular através do eixo geométrico  $q$  e um passo de fenda substancialmente regular de outro modo. As máquinas de relutância síncronas que empregam os discos de rotor (1) e os conjuntos de rotor de acordo com a presente invenção podem exibir uma baixa ondulação de torque sem sacrificar os altos valores de torque.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**ROTOR PARA UMA MÁQUINA DE RELUTÂNCIA SÍNCRONA**".

**CAMPO DA TÉCNICA**

[0001] A presente invenção refere-se a um rotor para uma máquina de relutância síncrona, especialmente à geometria das barreiras isolantes do rotor e ao efeito da geometria sobre o comportamento de ondulação de torque de máquina. A presente invenção refere-se ainda a um método para projetar um rotor para uma máquina de relutância síncrona.

**ANTECEDENTES DA TÉCNICA**

[0002] As máquinas de relutância síncronas conhecidas na técnica tipicamente compreendem estatores com enrolamentos de polifase que formam uma pluralidade de polos em um modo que se assemelha ao estator de um motor de indução. O conjunto de rotor da máquina de relutância síncrona normalmente não inclui enrolamentos elétricos, mas tem um número de polos em forma de segmentos magneticamente permeáveis. O conjunto de rotor está formado como uma estrutura anisotrópica onde cada polo da máquina de relutância tem uma direção de relutância mínima, um assim denominado eixo geométrico direito ou eixo geométrico  $d$ , e uma direção de relutância máxima, um assim denominado eixo geométrico de quadratura ou eixo geométrico  $q$ . Quando as correntes senoidais são aplicadas nos enrolamentos de polifase no estator, uma forma de onda de fluxo magnético aproximadamente senoidal é produzida na folga de ar formada entre os polos de estator e um contorno externo do conjunto de rotor. O rotor tentará alinhar a sua direção mais magneticamente permeável, o eixo geométrico  $d$ , com a direção do fluxo de pico deslocando o seu eixo geométrico  $d$  de relutância mínima até que um alinhamento dos campos magnéticos nos polos de estator e nos polos de rotor seja obtido. O processo de alinhamento resulta em um movimento rotativo do conjun-

to de rotor na mesma velocidade que o campo magnético de estator rotativo, isto é, na velocidade síncrona. O movimento rotativo do rotor gera um torque, o qual pode ser conduzido para o exterior da máquina de relutância, por exemplo, por um eixo de rotor ligado no conjunto de rotor e estendendo através de um seu eixo geométrico central.

[0003] De acordo com a figura 1 aos rotores 30 é dada uma estrutura anisotrópica alternando camadas de segmentos magneticamente permeáveis 3 e de barreiras magneticamente isolantes 4. O conjunto de rotor pode compreender uma pilha de laminações de rotor transversalmente orientadas ou laminações de rotor axialmente orientadas. No caso de laminações transversalmente orientadas mostradas na figura 1, o rotor 30 essencialmente consiste em uma pilha de finos discos de rotor 1 em que as barreiras isolantes 4 são criadas cortando o material na forma de fendas longitudinais. É por meio disto que o ar dentro dos recortes funciona como a barreira isolante 4. As estruturas de disco estão tipicamente projetadas para serem mecanicamente autossustentadas, os segmentos magneticamente permeáveis 3 estando conectados por nervuras tangenciais estreitas 16 na periferia dos discos. As nervuras radiais 17 próximas do meio dos segmentos são conhecidas de modo a aperfeiçoar a resistência mecânica dos discos. No caso de laminações axialmente orientadas, as barreiras isolantes 4 são feitas de algum material isolante sólido e as barreiras isolantes 4 alcançam a folga de ar entre o rotor 30 e o estator.

[0004] Um parâmetro importante do rotor é um passo de fenda de rotor, o qual pode ser definido como a distância entre duas camadas isolantes adjacentes medida na folga de ar entre o rotor e o estator. Os conjuntos de rotor têm sido convencionalmente projetados com um passo de fenda de rotor igual, isto é, todos os passos de fenda de rotor sendo de igual distância, e um passo de fenda de rotor igual, de modo a minimizar a ondulação de torque e prover um torque razoável. Outra

prática convencional tem sido ajustar o passo de fenda de rotor igual ao passo de fenda de estator.

[0005] A US 5.818.140 descreve um conjunto de rotor para um motor de relutância síncrono, a estrutura do conjunto de rotor transversalmente laminado sendo destinada a minimizar a sua ondulação de torque. O projeto de rotor descrito e a fórmula de projeto acompanhante requerem um passo de fenda de rotor igual e um passo de fenda de estator igual ao redor dos respectivos perímetros destes componentes.

[0006] A US 6.239.526 descreve um conjunto de rotor para um motor de relutância síncrono, em que as barreiras isolantes do rotor estão inclinadas na direção do eixo geométrico  $q$ . O passo de fenda de rotor por meio disto foi tornado não igual através tanto do eixo geométrico  $q$  quanto do eixo geométrico  $d$ , o objetivo sendo minimizar a ondulação de torque dimensionando as barreiras isolantes de modo que enquanto uma extremidade faceia um centro de uma fenda do estator, a outra extremidade faceia um centro de um dente do estator. Esta descrição assume que o passo de fenda de rotor entre o eixo geométrico  $q$  e o eixo geométrico  $d$  de cada polo é igual ao passo de fenda de estator.

[0007] No entanto, apesar das medidas tomadas para diminuir a ondulação de torque, os rotores projetados de acordo com os princípios de projeto convencionais ainda exibem uma alta ondulação de torque.

### **SUMÁRIO DA INVENÇÃO**

[0008] Um objetivo da invenção é prover um rotor para uma máquina de relutância síncrona, cujo rotor faz com que a máquina exiba uma baixa ondulação de torque. É um objetivo adicional da invenção prover um método para projetar um rotor para uma máquina de relutância síncrona para obter uma máquina que exibe uma baixa ondulação de torque.

[0009] Estes objetos são conseguidos pelo rotor de acordo com a invenção.

[00010] De acordo com um primeiro aspecto da invenção, está provido um rotor para uma máquina de relutância síncrona, uma seção transversal do rotor compreendendo: uma pluralidade de setores de polo, cada setor de polo compreendendo uma pluralidade de barreiras isolantes, cada barreira isolante estendendo entre dois pontos de passo, uma pluralidade de eixos geométricos  $q$ , cada eixo geométrico  $q$  definindo uma direção de relutância máxima do setor de polo correspondente, um perímetro definindo o contorno externo da seção transversal, uma pluralidade de pontos de referência localizados sobre o perímetro simetricamente com referência aos eixos geométricos  $q$ , os intervalos angulares entre os pontos de referência definindo os ângulos de referência os quais entre dois eixos geométricos  $q$  vizinhos têm um valor igual de  $\alpha_m = \gamma / (k-1)$ , em que  $\gamma$  é um ângulo entre dois pontos de passo que estão mais distantes afastados entre dois eixos geométricos  $q$  vizinhos e  $k$  é o número de pontos de passo entre dois eixos geométricos  $q$  vizinhos, um ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  definido por uma distância angular  $\delta$  entre dois pontos de passo vizinhos sobre lados opostos de um eixo geométrico  $q$ , o ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  tendo um valor o qual é diferente de  $\delta = 3 * \alpha_m$ , as posições angulares de cada ponto de passo e o ponto de referência mais próximo daquele ponto de passo têm um desvio que tem um valor  $\Delta\tau$  menor do que 3 graus.

[00011] Utilizando o passo de fenda de rotor através do eixo geométrico  $q$  (ângulo de passo de eixo geométrico  $q$ ) como uma variável de projeto ao invés de ajustar o seu valor igual ao restante dos passos de fenda de rotor ou ligar o seu valor ao passo de fenda de estator, uma liberdade de projeto aumentada comparada com as soluções da técnica anterior é conseguida o que permite a otimização do compor-

tamento de ondulação de torque da máquina. Os presentes inventores demonstraram tanto experimentalmente quanto por simulações do método de elemento finito (FEM) que selecionando um valor de  $\delta$  que é diferente de  $3 * \alpha_m$  tem um impacto significativo sobre medidas de desempenho importantes do disco de rotor, especificamente a ondulação de torque. Apesar de poder ser difícil derivar analiticamente o valor de  $\delta$  ótimo, logo que as variáveis de projeto do modelo de simulação são ajustadas, o ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  ótimo 12 pode facilmente ser encontrado em um pequeno número de etapas de iteração.

As posições angulares dos pontos de passo e dos pontos de referência mais próximos podem ter um desvio que tem um valor  $\Delta\tau$  menor do que 2,5 graus, tal como menor do que 2 graus, tal como menor do que 1 grau. Enquanto que os pontos de referência estão representando as posições angulares ótimas dos pontos de passo, um comportamento de ondulação de torque satisfatório pode ser conseguido mesmo quando as posições angulares dos pontos de passo e o ponto de referência correspondente têm um pequeno desvio.

[00012] Os ângulos de passo de eixo geométrico  $q$  podem diferir de  $\delta = 3 * \alpha_m$ , por pelo menos 1 grau, tal como pelo menos 2, 3, 5 ou 10 graus.

[00013] O rotor pode compreender uma nervura radial através de uma barreira isolante para aperfeiçoar a resistência mecânica do rotor.

[00014] O rotor pode compreender um recorte no perímetro de rotor sobre um eixo geométrico  $q$ . Provendo um disco de rotor com uma barreira isolante na forma de um recorte no perímetro de rotor o fluxo magnético nesta porção radial mais externa é desabilitado.

[00015] De acordo com um segundo aspecto da invenção, um método para projetar um rotor para uma máquina de relutância síncrona está provido, o método compreendendo: a) prover uma geometria bá-

sica do rotor, a geometria básica compreendendo: uma pluralidade de setores de polo, cada setor de polo compreendendo uma pluralidade de barreiras isolantes, cada barreira isolante estendendo entre dois pontos de passo, uma pluralidade de eixos geométricos  $q$ , cada eixo geométrico  $q$  definindo uma direção de relutância máxima do setor de polo correspondente, uma pluralidade de pontos de referência localizados sobre o perímetro simetricamente com referência aos eixos geométricos  $q$ , os intervalos angulares entre os pontos de referência definindo os ângulos de referência os quais entre dois eixos geométricos  $q$  vizinhos têm um valor igual de  $\alpha_m = \gamma / (k-1)$ , em que  $\gamma$  é um ângulo entre dois pontos de passo que estão mais distantes afastados entre dois eixos geométricos  $q$  vizinhos e  $k$  é o número de pontos de passo entre dois eixos geométricos  $q$  vizinhos, b) prover um modelo de simulação do rotor, o modelo de simulação compreendendo uma pluralidade de parâmetros de projeto, um dos parâmetros de projeto sendo um ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  definido por uma distância angular  $\delta$  entre dois pontos de passo vizinhos sobre lados opostos de um eixo geométrico  $q$ , c) executar uma simulação com pelo menos dois valores de  $\delta$  diferentes, d) determinar o valor de ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  com base nos resultados de simulação.

[00016] Um modelo de simulação é necessário de modo a se aproveitar efetivamente da presente invenção. Quando um modelo de simulação que compreende um parâmetro  $\delta$  para o ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  uma vez é criado, é fácil executar simulações com diferentes valores  $\delta$  de modo a encontrar um valor ótimo.

[00017] O modelo de simulação pode estar configurado para retornar um valor que corresponde à ondulação de torque.  $\delta$  é aumentado e/ou diminuído até que pelo menos um mínimo local do valor que corresponde à ondulação de torque seja encontrado, e o valor de ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  é determinado para corresponder ao

mínimo local da ondulação de torque. É relativamente fácil descobrir o comportamento da curva de ondulação de torque por um pequeno número de simulações com valores  $\delta$  discretos, e é lógico dar ao ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  um valor  $\delta$  que resulte em uma ondulação de torque mínima.

[00018] O valor inicial do ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  pode ser escolhido para ser  $\delta = 3 * \alpha_m$ . Apesar do valor de ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  inicial poder ser escolhido arbitrariamente, escolher  $\delta = 3 * \alpha_m$  é um bom ponto de partida e dá uma ideia como o comportamento de ondulação de torque é aperfeiçoado comparado com as soluções da técnica anterior.

#### **BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS**

[00019] A invenção será explicada em maiores detalhes com referência aos desenhos acompanhantes, em que

a figura 1 mostra um rotor de acordo com uma modalidade da invenção com discos de rotor transversalmente orientados,

a figura 2 mostra um disco de rotor sem recortes,

a figura 3 mostra um disco de rotor com recortes,

a figura 4 mostra um disco de rotor com a definição de pontos de referência e ângulos de referência ilustrada,

a figura 5 mostra uma curva de torque / ondulação de torque simulada para um certo disco de rotor como uma função do ângulo de passo de eixo geométrico  $q$ , e uma mudança correspondente na geometria de disco de rotor, e

a figura 6 mostra uma curva de ondulação de torque relativa que corresponde à curva da figura 5.

#### **DESCRIÇÃO DE MODALIDADES PREFERIDAS**

[00020] A figura 1 mostra um rotor 30 de acordo com uma modalidade da invenção, o rotor 30 essencialmente consistindo em uma pilha de finos discos de rotor 1.

[00021] A figura 2 mostra um disco de rotor 1 para um rotor 30 de acordo com uma modalidade da invenção. O disco de rotor 1 apresentado compreende quatro setores de polo 15, cada setor de polo 15 compreendendo cinco segmentos 3 feitos de um material com alta permeabilidade magnética relativa. Cada um dos cinco segmentos magneticamente permeáveis 3 tem uma forma em formato de braço que se estende entre duas posições angulares predeterminadas sobre o perímetro de disco 2. Quatro barreiras isolantes 4 estão intermitentemente dispostas entre os segmentos permeáveis 3 em um modo onde um padrão alternante de segmentos magneticamente permeáveis 3 e barreiras isolantes 4 está formado ao longo dos eixos geométricos q 7 do disco de rotor 1 de uma abertura central 14 na direção do perímetro de disco 2. As barreiras isolantes 4 estão separadas da folga de ar 18 entre o rotor 30 e o eixo estator 19 por nervuras tangenciais 16. Opcionalmente as nervuras tangenciais 16 podem ser omitidas se a estrutura mecânica do disco de rotor 1 for assegurada por outros meios. O disco de rotor 1 está formado como um único elemento unitário fabricado por punçionamento ou estampagem de um suporte metálico. O suporte metálico compreende um metal ou liga ferromagnético com uma alta permeabilidade magnética relativa. A abertura central 14 está formada para coincidir com um eixo de rotor.

[00022] As barreiras isolantes 4 estão se estendendo entre dois pontos de passo 5 no perímetro 2 do disco de rotor 1. As posições dos pontos de passo 5 precisam ser precisamente definidas já que estas têm uma grande significância para a ondulação de torque resultante. Como as barreiras isolantes 4 podem ter muitas formas diferentes e as porções de extremidade dos recortes frequentemente têm uma forma arredondada, não é sempre óbvio qual ponto exatamente deve ser considerado como o ponto de passo 5. Para o propósito da descrição, as seguintes definições são feitas para os pontos de passo 5: Um pon-

to de passo 5 é um ponto sobre o perímetro 2 do disco de rotor 1. Em casos onde a barreira isolante 4 atinge uma folga de ar 18 entre o disco de rotor 1 e um estator 19 circundante, o ponto de passo 5 deve ser considerado ficar no meio da abertura que separa dois segmentos magneticamente permeáveis 3 vizinhos. Em casos onde as barreiras isolantes 4 estão separadas da folga de ar 18 por nervuras tangenciais 16, o ponto de passo 5 deve ser considerado ficar sobre a continuação imaginária do eixo geométrico médio da barreira isolante 4 levando em conta a forma total de todas as barreiras isolantes 4. Isto é frequentemente o ponto mais estreito das nervuras tangenciais 16, mas não precisa ser. No entanto, o ponto de passo 5 é neste caso um ponto sobre a nervura tangencial 16, e frequentemente isto coincide com o ponto mais estreito da nervura tangencial 16. No caso de um tipo de recorte de disco de rotor 1 com uma barreira isolante 4 na porção radial mais externa do eixo geométrico  $q$  7, a barreira isolante mais externa 4 é considerada não ter pontos de passo 5.

[00023] Os discos de rotor 1 são distinguidos entre dois projetos diferentes dependendo se a porção radial mais externa sobre um eixo geométrico  $q$  7 é um segmento magneticamente permeável 3 ou uma barreira isolante 4. Um disco de rotor 1 com um recorte 11 refere-se a um tipo de rotor mostrado na figura 3 em que a porção mais externa do setor de polo de rotor 15 compreende uma barreira isolante 4, por exemplo, o ar em forma de um rebaixo raso provido na borda periférica do perímetro de rotor 2. O disco de rotor 1 está provido com recortes 11 de modo a desabilitar o fluxo magnético nas porções radiais mais externas dos eixos geométricos  $q$  7. Ao contrário, um disco de rotor 1 sem um recorte 11 refere-se a um tipo de rotor mostrado na figura 2 em que a porção mais externa do setor de polo de rotor 15 consiste em um segmento magneticamente permeável 3 que forma um perímetro semicircular substancialmente liso 2.

[00024] Como a invenção está baseada em modificações na geometria de barreira isolante, as quais podem não ser imediatamente aparentes sem fazer algumas medições, aqui definimos alguns pontos de referência auxiliares 8, os quais são úteis para explicar a invenção e para tornar as modificações prontamente mensuráveis. A figura 4 é um desenho esquemático que mostra as definições dos pontos de referência 8 e dos ângulos de referência 9, 10 relativos aos pontos de referência 8. O número de barreiras isolantes 4 foi escolhido ser pequeno (duas) para a clareza do desenho, mas qualquer número adequado de barreiras pode ser escolhido. Os pontos de referência 8 estão localizados sobre o perímetro 2 do disco de rotor 1 simetricamente com relação aos eixos geométricos q 7. Os intervalos regulares entre os pontos de referência 8 definem os ângulos de referência 9, 10 os quais entre dois eixos geométricos q 7 vizinhos têm um valor igual  $\alpha_m$ . O valor  $\alpha_m$  é definido tomando a média das distâncias angulares dos pontos de passo 5 entre dois eixos geométricos q 7 vizinhos, isto é,

$$\alpha_m = \frac{\gamma}{(k-1)} \quad (1)$$

em que  $\gamma$  é o valor do ângulo 13 entre dois pontos de passo 5 que estão mais afastados entre dois eixos geométricos q 7 vizinhos, e k é o número de pontos de passo 5 entre dois eixos geométricos q 7 vizinhos.

[00025] Na figura 4, os pontos de referência 8 estão marcados com círculos e cruces, os círculos representando os pontos de referência 8 reais e as cruces representando os pontos de referência 8 virtuais. Os pontos de referência 8 reais estão relacionados com os pontos de passo 5 reais. Os pontos de referência 8 virtuais estão relacionados com os pontos de passo de barreiras isolantes 4 que por razões mecânicas ou outras não foram realizados. Uma barreira isolante 4 provida entre os pontos de referência 8 virtuais se tornaria muito pequena e

teria muito pouca significância para o desempenho da máquina. Os pontos de passo virtuais são convencionalmente utilizados para ilustrar que o ângulo de passo é igual mesmo através dos eixos geométricos q 7 onde nenhuma barreira isolante 4 real está presente. Na figura 4 os pontos de referência 8 virtuais são utilizados para ilustrar, ao contrário, que os ângulos de referência 10 através dos eixos geométricos q 7 são diferentes dos ângulos de referência 9 entre dois eixos geométricos q 7 vizinhos. De outro modo, os pontos de referência 8 virtuais não têm significância para a presente invenção.

[00026] Um ângulo de passo de eixo geométrico q 12 é definido por uma distância angular entre dois pontos de passo 5 vizinhos sobre os lados opostos de um eixo geométrico q 7, e é denotado por  $\delta$ . Apesar de que em um rotor convencional 30 com um passo de fenda de rotor igual o ângulo de passo de eixo geométrico q 12 torna-se  $\delta = 3 * \alpha_m$ , de acordo com a presente modalidade  $\delta$  pode tomar um valor arbitrário o qual pode ser maior ou menor do que  $3 * \alpha_m$ . Pode, no entanto, acontecer que o ângulo de passo de eixo geométrico q 12 no qual o comportamento de ondulação de torque ótimo é conseguido chega a um valor de  $\delta = 3 * \alpha_m$ , mas esta é uma condição excepcional e fica fora do escopo de proteção buscado. De acordo com um grande número de casos de teste conduzidos, o valor de  $\delta$  ótimo normalmente difere consideravelmente de  $3 * \alpha_m$ . Os casos de teste conduzidos estão mostrando valores para uma diferença relativa  $\eta_\delta$

$$\eta_\delta = \frac{\delta - 3 \cdot \alpha_m}{3 \cdot \alpha_m} \cdot 100\% \quad (2)$$

de  $\eta_\delta = -46\%$  a  $\eta_\delta = +117\%$  (que corresponde a  $\delta \approx 1,6 * \alpha_m$  e  $\delta \approx 6,5 * \alpha_m$ , respectivamente). O ângulo de passo de eixo geométrico q 12 não atinge o valor de  $\delta = 0$  graus, já que esta condição corresponderia a remover uma das barreiras isolantes 4. O valor máximo de

$\delta$  está em teoria limitado à largura angular do setor de polo 15, mas na prática  $\delta$  deve ter um valor consideravelmente menor de modo que as barreiras isolantes 4 obtenham larguras razoáveis e a máquina obtenha um torque razoável. De acordo com os casos de teste conduzidos para um rotor de quatro polos (setor de polo 15 de 90 graus) os valores de  $\delta$  acima de 50 graus são raros.

[00027] A modificação dos ângulos de passo de eixo geométrico q 12 afeta os ângulos de referência 9, 10 já que a soma de  $\delta$  e o ângulo 13 entre dois pontos de passo 5 mais externos entre dois eixos geométricos q 7 vizinhos, denotada por  $\gamma$ , é uma constante dependendo do número de polos de rotor. Isto pode ser expresso como

$$\delta + \gamma = \frac{2 \cdot \pi}{p} \quad [\text{rad}] \quad (3)$$

em que  $p$  é o número de polos do disco de rotor 1. Para um rotor de quatro polos  $\delta + \gamma = \pi/2$  rad (90 graus), como pode ser prontamente observado da figura 4. Resolvendo  $\gamma$  da equação (3) e substituindo na definição de ângulo de referência 9 anteriormente estabelecida da equação (1), podemos expressar  $\alpha_m$  como uma função de  $\delta$ :

$$\alpha_m = \frac{\gamma}{(k-1)} = \frac{2 \cdot \pi - p \cdot \delta}{p \cdot (k-1)} \quad (4)$$

[00028] Após escolher o valor de  $\delta$  todas as barreiras isolantes 4 são modificadas conseqüentemente para tornar as posições angulares dos pontos de passo 5 para corresponderem ao  $\alpha_m$  recentemente definido. O dimensionamento do disco de rotor 1 de acordo com a presente invenção pode compreender diversas etapas de iteração onde diferentes valores de  $\delta$  são testados de modo a encontrar um valor que corresponda a um comportamento de ondulação de torque ótimo. O teste pode ser feito utilizando um FEM e uma simulação de computador.

[00029] Os pontos de referência 8 representam as posições angulares ótimas dos pontos de passo 5, mas pequenos desvios 20 nas posições angulares dos pontos de passo 5 e dos pontos de referência 8 correspondentes são permitidos como denotado por  $\Delta\tau$  na figura 4. Somente as posições angulares dos dois pontos de passo que estão mais afastados entre dois eixos geométricos  $q$  7 vizinhos precisam coincidir com as posições angulares dos pontos de referência 8 correspondentes, esta condição seguindo da definição dos pontos de referência 8. A magnitude  $\Delta\tau$  permitida do desvio 20 representa uma tolerância dentro da qual um valor de ondulação de torque satisfatório é conseguido. De acordo com as simulações feitas em um número de projetos de rotor em combinação com estatores que tem um número variado de fendas,  $\Delta\tau$  deve ter um valor menor do que 3 graus, de preferência menor do que 2,5 graus, mais de preferência menor do que 2 graus, e ainda mais de preferência menor do que 1 grau. Na figura 4 o desvio 20 está exagerado para o propósito de ilustração.

[00030] A presente invenção deve ser de preferência utilizada em combinação com um modelo de simulação apropriado, o qual pode estar configurado para retornar uma medida de desempenho determinada do disco de rotor 1, tal como a ondulação de torque, o torque, a razão entre o torque e a ondulação de torque ou o fator de potência. Como pode ser compreendido da descrição anterior, é essencial para a invenção que uma das variáveis de projeto do modelo de simulação seja o ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  12, mas o modelo pode compreender um número desejado de outras variáveis de projeto também. Os modelos de simulação podem diferir muito dependendo da geometria geral da seção transversal de rotor e da forma das barreiras de isolamento 4. É assumido que uma pessoa versada na técnica seja capaz de criar um modelo de simulação tal como uma representação magnética de um disco de rotor 1 na forma de um modelo

de disco de FEM de modo a aplicar a presente invenção em um modo efetivo. O modelo de disco de FEM pode ser criado com um programa de elemento finito comercialmente disponível, por exemplo, Flux2D do CEDRAFT Group ou Maxwell® suprido pela Ansoft, inserindo dados relevantes que definem a geometria e as dimensões de disco de rotor, e as propriedades magnéticas e elétricas do material de disco de rotor.

[00031] Conseqüentemente, introduzindo a nova variável de projeto  $\delta$  no modelo de disco de rotor e mudando o seu valor o efeito resultante sobre qualquer medição de desempenho desejada do disco de rotor 1 pode ser determinado. Por exemplo, como ilustrado na figura 5 c), a seleção do valor de  $\delta$  entre 30 e 38 graus (que corresponde a  $\delta = 3,5 * \alpha_m$  e  $\delta = 5,1 * \alpha_m$ , respectivamente) para um projeto de disco de rotor de quatro polos ( $p=4$ ) e quatro barreiras ( $k=8$ ) leva a um aperfeiçoamento considerável na ondulação de torque sem um efeito prejudicial notável sobre o torque médio. Esta percepção levou os inventores para as metodologias de modelagem de disco de rotor baseadas em  $\delta$  presente-mente descritas como uma ferramenta para otimizar as medidas de desempenho predeterminadas do modelo de disco de rotor.

[00032] A figura 5 c) é um gráfico que ilustra um torque de disco de rotor médio 40 e uma ondulação de torque de pico a pico 41 em valor absoluto como uma função da variável de projeto  $\delta$  para um certo modelo de disco de rotor. A unidade sobre o eixo geométrico y é Nm (Newton metro) e a unidade sobre o eixo geométrico x é graus. A variável  $\delta$  é escalonada através do conjunto de valores discretos 42 indicados por pontos cheios sobre a curva de ondulação de torque. As duas porções de disco de rotor apresentadas nas figuras 5 a) e 5 b) ilustram o efeito de mudar o valor de  $\delta$  para a geometria de disco de rotor 1. A figura 5 a) representa um valor  $\delta$  de aproximadamente 27 graus que corresponde a um passo de fenda de rotor igual  $\delta = 3 * \alpha_m$ , e a figura 5 b) representa um valor de  $\delta$  de aproximadamente 31,7 graus ( $\delta \approx 3,8 * \alpha_m$ ).

[00033] A variação de ondulação de torque apresentada na figura 5 c) em diferentes valores de  $\delta$  claramente demonstra as vantagens significativas obteníveis pela aplicação da presente invenção no projeto de disco de rotor. Para a condição de passo de fenda de rotor igual acima mencionada, a ondulação de torque 41 foi computada para aproximadamente 12,6 Nm enquanto que o torque médio 40 era de aproximadamente 33 Nm. No mínimo local da ondulação de torque 41 com o valor de  $\delta$  ao redor de 31,7 graus, a ondulação de torque 41 associada é consideravelmente reduzida para aproximadamente 4,2 Nm enquanto que o torque médio 40 permanece essencialmente constante com um alto valor ao redor de 33 Nm.

[00034] A curva de ondulação de torque 43 no gráfico da figura 6 é derivada dos dados da figura 5 c) computando e exibindo a ondulação de torque pico a pico 41 como uma percentagem do torque de disco de rotor médio 40 e mapeando a unidade de percentagem sobre o eixo geométrico y. Esta medida de desempenho é de interesse prático significativo porque esta expressa quão grande uma parte da ondulação de torque 41 é do torque médio 40. O eixo geométrico x mostra o valor de  $\delta$  em graus como é o caso na figura 5 c). Mais uma vez, o aperfeiçoamento considerável que pode ser obtido na razão entre a ondulação de torque 41 e o torque médio 40 otimizando o valor de  $\delta$  está demonstrado.

[00035] A invenção não está limitada às modalidades acima descritas, mas a pessoa versada na técnica pode, é claro, modificá-las em uma pluralidade de modos dentro do escopo da invenção como definido pelas concretizações. Enquanto que na descrição anterior uma referência é principalmente feita a discos de rotor, deve ficar claro para a pessoa versada na técnica que os mesmos princípios de projeto podem ser aplicados a laminações axialmente orientadas.

## REIVINDICAÇÕES

1. Rotor (30) para uma máquina de relutância síncrona, sendo que a máquina de relutância síncrona compreende um estator (19) com 36 fendas de estator,

uma seção transversal do rotor (30) possuindo

quatro seções polares (15) dispostas simetricamente em torno de uma abertura central (14) da seção transversal, cada seção polar (15) possuindo uma pluralidade de barreiras isolantes (4), cada barreira isolante (4) se estendendo entre dois pontos de passo (5),

uma pluralidade de eixos geométricos  $q$  (7), cada eixo geométrico  $q$  (7) definindo uma direção de relutância máxima da seção polar (15) correspondente,

um perímetro (2) que define o contorno externo da seção transversal,

uma pluralidade de pontos de referência (8) localizados no perímetro (2) simetricamente com referência aos eixos geométricos  $q$  (7), os intervalos angulares entre os pontos de referência (8) definindo ângulos de referência (9, 10) os quais, entre dois eixos geométricos  $q$  (7) circunferencialmente adjacentes, têm um valor igual de  $\alpha_m = \gamma/(k-1)$ , sendo que  $\gamma$  é um ângulo (13) entre dois pontos de passo (5) que estão mais distantemente afastados entre dois eixos geométricos  $q$  (7) circunferencialmente adjacentes e  $k$  é o número de pontos de passo (5) entre dois eixos geométricos  $q$  (7) circunferencialmente adjacentes,

um ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  (12) definido por uma distância angular  $\delta$  entre dois pontos de passo (5) circunferencialmente adjacentes sobre lados opostos de um eixo geométrico  $q$  (7), o ângulo de passo de eixo geométrico  $q$  (12) tendo um valor o qual é diferente de  $\delta = l^* \alpha_m$ , no qual  $l$  é um conjunto de todos os inteiros,

as posições angulares de cada ponto de passo (5) e o ponto

de referência (8) mais próximo daquele ponto de passo (5) têm um desvio (20) que tem um valor  $\Delta\tau$  menor do que 2,5 graus,

caracterizado pelo fato de que

o ângulo de passo de eixo geométrico q (12) possui um valor  $\delta$  de 50 graus ou menos e  $k=8$ .

2. Rotor (30), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que as posições angulares dos pontos de passo (5) e dos pontos de referência (8) mais próximos têm um desvio (20) que tem um valor  $\Delta\tau$  menor do que 2 graus, tal como menor do que 1 grau.

3. Rotor (30), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que os ângulos de passo de eixo geométrico q (12) diferem de  $\delta = 3*\alpha_m$  por pelo menos 1 grau, tal como pelo menos 2, 3, 5 ou 10 graus.

4. Rotor (30), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende uma nervura radial (17) através de uma barreira isolante (4) para aperfeiçoar a resistência mecânica do rotor (30).

5. Rotor (30), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende um recorte (11) no perímetro de rotor (2) sobre um eixo geométrico q (7).

6. Rotor (30), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o ângulo de passo de eixo geométrico q (12) tem um valor  $\delta$  entre 30 e 38 graus.

7. Rotor (30), de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que os pontos de referência (8) são distribuídos desigualmente ao redor do perímetro (2).

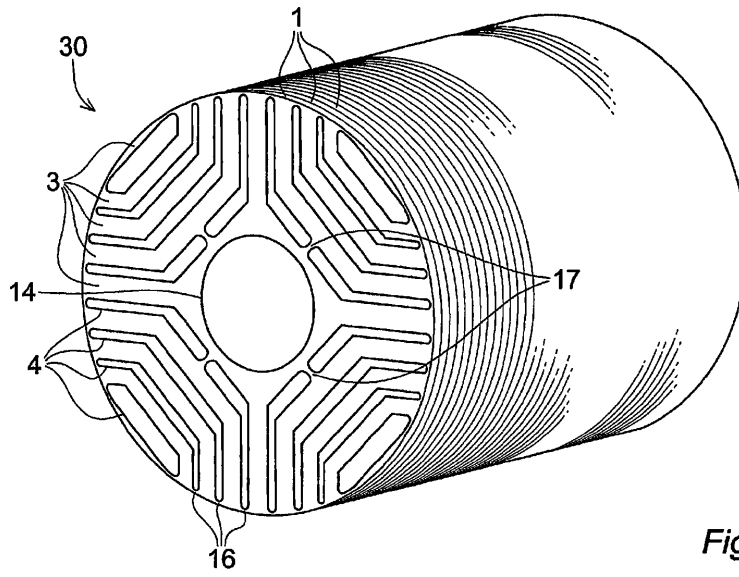


Fig. 1

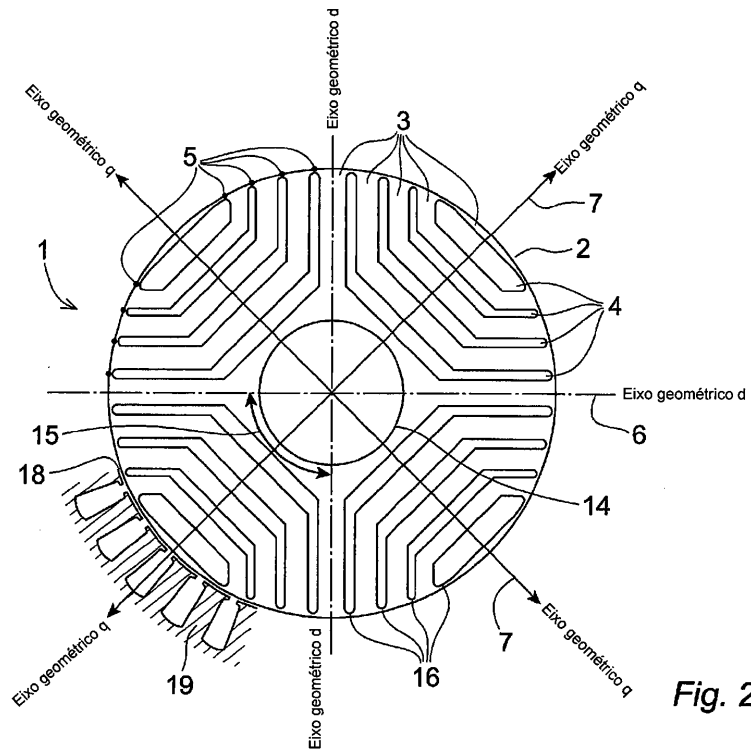


Fig. 2

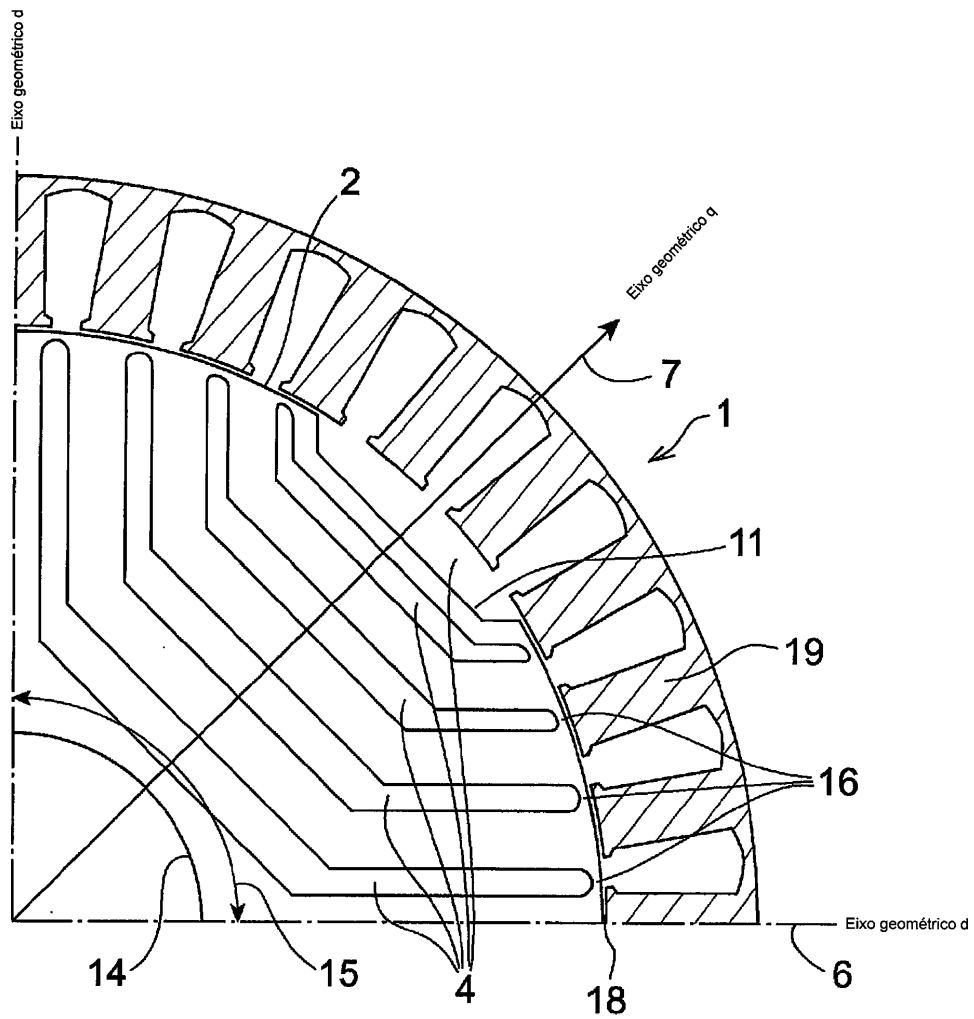


Fig. 3

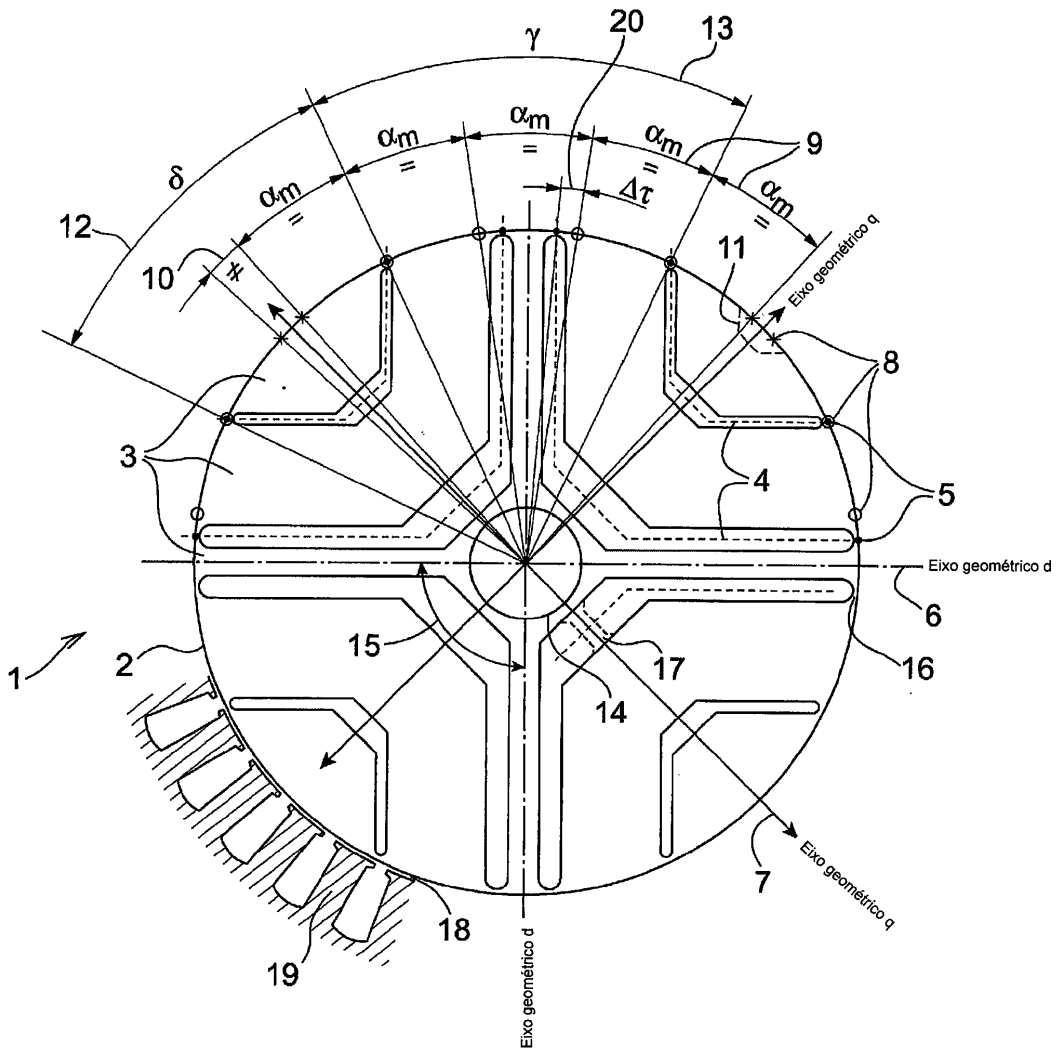


Fig. 4

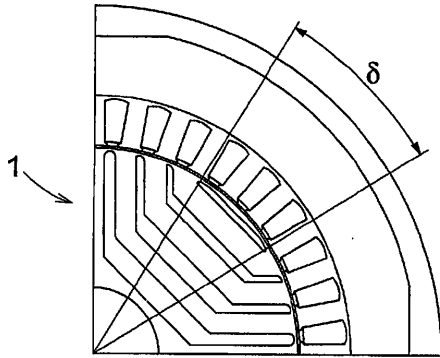


Fig. 5a

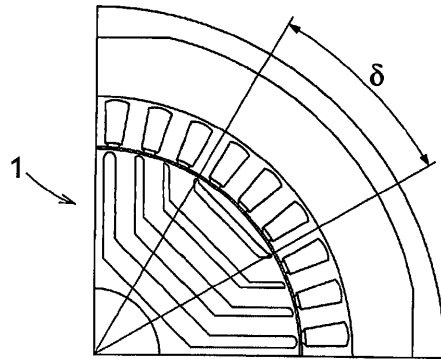


Fig. 5b

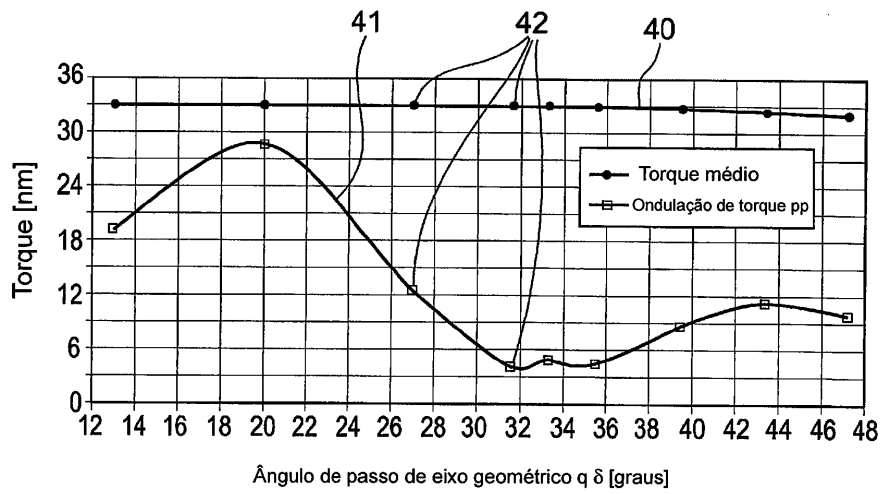
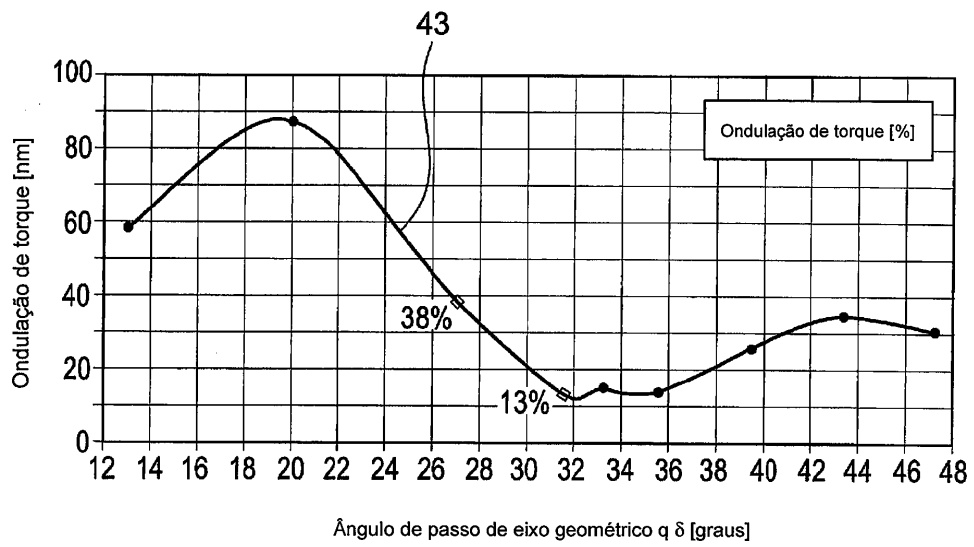


Fig. 5c

*Fig. 6*