ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ANDRÉ CAMARGO MATHIAZZI

Análise da variação da tensão gerada e do estado de magnetização em
um gerador com ímãs permanentes

São Paulo

2007

ANDRÉ CAMARGO MATHIAZZI

Análise da variação da tensão gerada e do estado de magnetização em
um gerador com ímãs permanentes

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Sistemas de Potência
Orientador: Professor Doutor Ivan Eduardo Chabu

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 10 de agosto de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Mathiazzi, André Camargo

Análise da variação da tensão gerada e do estado de magnetização em um gerador com ímãs permanentes / A.C. Mathiazzi.

-- ed.rev. -- São Paulo, 2007.

65 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Máquinas elétricas 2.Gerador elétrico com ímãs permanentes 3.Reação de armadura I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Maria Fernanda e
à minha filha Júlia.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu que me orientou pacientemente sempre buscando o melhor.

Ao Engenheiro e amigo Jorge Alberto da Silva pelo apoio e auxílio constantes.

Aos amigos do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo que colaboraram de forma direta ou indireta para concretização deste trabalho.

Ao Centro Tecnológico da Marinha pelo apoio e auxílio no desenvolvimento do protótipo estudado.

Aos amigos pela força e estímulo nos momentos de decisões.

À minha família que me acompanhou nos momentos difíceis e vibrou positivamente nos momentos de minha ausência física e mental.

*Não há nada de nobre em sermos superiores
ao próximo. A verdadeira nobreza consiste
em sermos superiores ao que éramos antes.*
(Autor desconhecido)

RESUMO

Visando analisar o comportamento de um gerador de ímãs permanentes a partir de diferentes pontos de carga aplicada, quantificando a magnetização dos ímãs presentes, desenvolveu-se um protótipo com desenho propício à adaptação para geradores eólicos. Como o objetivo é a obtenção do comportamento da magnetização dos ímãs permanentes com vários pontos de carga acoplada, optou-se pela utilização de ímãs de ferrite, com valor médio da densidade de fluxo magnético remanente (B_r) igual a 0,39 T. Desta forma, o valor da carga acoplada não necessita atingir valores elevados para verificação da variação do comportamento da tensão após aplicação de carga, facilitando a avaliação de possível desmagnetização parcial ou total dos ímãs instalados. Adicionalmente é estudada divisão de carga do gerador, com tensão de saída retificada, operando em paralelo com um barramento C.C. ou banco de baterias. É apresentada uma abordagem analítica de estudo da desmagnetização dos ímãs permanentes do gerador, bem como um levantamento experimental do mesmo. Conduta semelhante é adotada no estudo da divisão de carga.

Palavras-chave: Gerador elétrico, ímã permanente, ponto de operação.

ABSTRACT

Aiming to analyze the performance of a permanent magnet generator, operating under variable load and quantifying the corresponding condition of its magnets, we have developed a prototype adaptable to wind generators. As one of the purposes of this work is to study the magnetic performance of the permanent magnets in several points of load, we have chosen ferrite magnets with average remanence (B_r) of 0.39 T. Thus, even light variations in load are enough to verify the variation of the generated voltage, which eases the rating of total or partial demagnetization of the installed magnets. Additionally, we study load share of that generator, with rectified output, operating in parallel with D.C. bus or battery bank. An analytic approach of demagnetization of the generator's permanent magnets is also presented, as well as an experimental survey of it. A similar procedure is adopted in the study of the load share.

Keywords: Electrical generator, permanent magnet, operation point.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

• Figura 1 – Curva de desmagnetização, de retorno e de permeabilidade.....	18
• Figura 2 – Exemplo da circuitação do campo magnético induzido.....	20
• Figura 3 – Exemplo da magnetização final após o fenômeno de reação de armadura.....	21
• Figura 4 – Ilustração do gerador desenvolvido.....	23
• Figura 5 – Desenho da lâmina utilizada no estator.....	24
• Figura 6 – Diagrama de ligações do gerador quadrifásico.....	25
• Figura 7 – Vista explodida e em corte longitudinal do gerador.....	28
• Figura 8 – Apresentação em corte de um setor do circuito magnético.....	29
• Figura 9 – Apresentação das dimensões utilizadas no circuito magnético.....	29
• Figura 10 – Ciclo de Histerese do ímã estudado (ferrite de estrôncio).....	30
• Figura 11 – Ponto de operação calculado para o gerador em vazio	37
• Figura 12 – Pontos de operação calculados para as condições: em vazio, carga nominal e carga máxima.....	40
• Figura 13 – Diagrama fasorial das componentes elétricas do gerador estudado.....	41
• Figura 14 - Apresentação do protótipo.....	45
• Figura 15 – Esquema de ligações para ensaio sem retificação.....	47
• Figura 16 – Formas de ondas experimentais das tensões geradas em todas as fases apresentadas simultaneamente	48
• Figura 17 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em condição nominal de carga e sinal da rotação do eixo do rotor	49
• Figura 18 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em condição máxima de carga e sinal da rotação do eixo do rotor	49
• Figura 19 – Valores comparativos entre dados experimentais e teóricos...50	
• Figura 20 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em vazio de carga, com retificador acoplado e sinal da rotação do eixo do rotor.....	51

- Figura 21 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em condição nominal de carga, com retificador acoplado e sinal da rotação do eixo do rotor..... 51
- Figura 22 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em condição máxima de carga, com retificador acoplado e sinal da rotação do eixo do rotor..... 52
- Figura 23 – Dados comparativos entre valores teóricos e experimentais de tensão de saída do gerador com retificação (onda completa) e rotação de 1000 RPM.....52
- Figura 24 – Espectro dos componentes harmônicos presentes na forma de onda da tensão, obtido com leituras entre os pontos A1 e N para a condição em vazio, entre 0 e 1,6 kHz..... 53
- Figura 25 – Espectro dos componentes harmônicos presentes na forma de onda da tensão, obtido com leituras entre os pontos A1 e N para a condição em carga nominal entre 0 e 1,6 kHz54
- Figura 26 – Espectro dos componentes harmônicos presentes na forma de onda da tensão, obtido com leituras entre os pontos A1 e N para a condição em carga máxima entre 0 e 1,6 kHz54
- Figura 27 – Apresentação de formas de ondas em uma fonte polifásica com retificação não controlada com ângulo de comutação..... 56
- Figura 28 – Equipamentos utilizados para realização do paralelismo..... 58
- Figura 29 – Circuito proposto para estudo de paralelismo.....59
- Figura 30 – Circuito montado para estudo de paralelismo.....59
- Figura 31 – Gráfico demonstrativo do paralelismo realizado..... 60

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Valores teóricos para as seguintes condições de operação:
em vazio, em carga nominal e em carga máxima 42
- Tabela 2 – Tabela comparativa de valores calculados e experimentais sem
retificação e para as condições em vazio, com carga nominal e com carga
máxima 46
- Tabela 3 – Dados obtidos do paralelismo realizado..... 61

LISTA DE SÍMBOLOS

b_{cr} :	espessura da coroa do rotor [m];
b_{ds} :	largura do dente do estator [m];
B_{cr} :	densidade de fluxo magnético na coroa do rotor [T];
B_{cs} :	densidade de fluxo magnético na coroa do estator [T];
b_{cs} :	largura da coroa do estator [m];
B_{ds} :	densidade de fluxo magnético no dente do estator [T];
B_g :	densidade de fluxo magnético no entreferro [T];
$B_{ímã}$:	densidade de fluxo magnético referido ao ímã [T];
b_s :	abertura da ranhura do estator [m];
C_0 :	torque específico [N.m/m ³];
D :	diâmetro no entreferro;
E, E_A :	tensão induzida [V];
f :	frequência [Hz]
F_A :	reação de armadura [A _{-espira} /pólo]
F_{cr} :	força magnetomotriz na coroa do rotor [A];
F_{cs} :	força magnetomotriz na coroa do estator [A];
F_{ds} :	força magnetomotriz no dente do estator [A];
F_e :	fator de empilhamento;
F_g :	Força magnetomotriz no entreferro [A];
$F_{ímã}$:	força magnetomotriz referida ao ímã [A];
H_{cr} :	intensidade de campo magnético na coroa do rotor [A/m];
H_{cs} :	intensidade de campo magnético na coroa do estator [A/m];
H_{ds} :	intensidade de campo magnético no dente do estator [A/m];
I_{CC} :	corrente elétrica retificada [A]
i_{ef} :	valor eficaz da corrente nos condutores [A];
I_f :	corrente elétrica alternada de fase [A]
$i_{médio}$:	corrente média nos condutores [A];
K_e :	fator de enrolamento;
K_f :	fator de forma de distribuição de campo magnético;
K_g :	fator de Carter;
L :	comprimento do pacote de lâminas do estator [m];

L_{cr} : comprimento da coroa do rotor [m];
 l_{cr} : comprimento da circuitação na coroa do rotor [m];
 l_{cs} : comprimento da circuitação na coroa do estator [m];
 l_{ds} : altura de um dente do estator [m];
 l_g : comprimento do entreferro [m];
 $L_{ímã}$: comprimento dos ímãs do pólo [m];
 m : número de fases do enrolamento
 N : número de espiras/fase;
 n : velocidade angular (s^{-1});
 N_d : número de dentes;
 N_f : número de espiras por fase;
 p : número de pares de pólos
 P : potência elétrica [W]
 q : densidade linear de corrente [Acond/m];
 R_f : resistência por fase [Ω /fase];
 V_0 : tensão em vazio retificada[V]
 V_{CC} : tensão retificada [V]
 V_f : tensão alternada de fase eficaz [V]
 X_d : reatância de dispersão [Ω /fase];
 X_s : reatância síncrona [Ω /fase]
 X_{sm} : reatância síncrona de magnetização [Ω /fase]
 z_c : quantidade de condutores totais dispostos na periferia do entreferro;
 μ : ângulo de comutação;
 φ : ângulo do fator de potência;
 δ : fator auxiliar para cálculo do Fator de Carter;
 ϕ_p : fluxo magnético por pólo [Wb];
 $\phi_{ímã}$: fluxo magnético por unidade de ímã [Wb];
 τ_s : passo de ranhura [m];
 τ_p : passo polar no entreferro [m];
 ω : rotação do rotor [RPM].

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Histórico.....	16
1.2 Fenômeno físico.....	17
1.2.1 Reação de armadura	19
1.3 Objetivo.....	22
2. PROJETO DO GERADOR DE ÍMÃS PERMANENTES.....	23
2.1 Considerações gerais.....	23
2.2 Saída do gerador.....	25
2.3 Dimensionamento analítico do protótipo - determinação do volume da parte ativa.....	26
2.4 Caracterização dos ímãs utilizados.....	30
2.5 Procedimento para obtenção do ponto de operação do circuito magné- tico do gerador.....	31
2.6 Cálculo das bobinas do gerador e tensões geradas.....	37
2.7 Efeitos da reação de armadura.....	38
3. APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO.....	43
4. ESTUDO DAS TENSÕES GERADOR.....	46
4.1 Análise de dados calculados e medidos no gerador estudado sem retificação.....	46
4.2 Análise de dados calculados e medidos no gerador estudado com retificação.....	50
4.3 Fenômeno de comutação entre diodos retificadores.....	55
5. APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO EM PARALELISMO.....	57
5.1 Apresentação do ensaio.....	57

5.2 Aplicação prática do protótipo em sistema com paralelismo de fontes de energia.....	58
6. CONCLUSÕES.....	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

1.1. Histórico

A utilização de geradores com montagem contendo ímãs permanentes torna-se interessante para utilização em locais que não possuam, de maneira acessível, o fornecimento de energia elétrica para excitação de bobinas de geração de campo magnético, pois os ímãs permanentes já possuem a magnetização necessária para geração de energia, bastando um agente externo para impor movimento ao sistema. Com as atuais características de fabricação de ímãs permanentes [1], obtém-se compostos (terras-raras) cuja densidade de campo magnético atinge valores bem significativos, acima de 1,4 T. Neste trabalho optou-se por utilizar ímãs de ferrite, mais especificamente com estrôncio em sua composição, que apresentam densidade de fluxo magnético da ordem de 0,39 T.

A opção por ímãs de ferrite foi feita em função do custo e também da disponibilidade de fornecimento, especialmente no Brasil. Embora máquinas com ímãs mais nobres tornem-se mais compactas e com maior disponibilidade de potência, o custo elevado e também as dificuldades de manuseio limitam seu emprego nessa aplicação.

A limitação imposta pela reação de armadura na desmagnetização dos ímãs é um ponto que merece atenção no projeto e utilização de máquinas com esse meio de excitação. Este aspecto deve ser levado em consideração no projeto da máquina visando determinar o ponto de operação limite até onde o risco de desmagnetização irreversível dos ímãs passe a ser considerável. É apresentada uma metodologia de resolução do circuito magnético com valores referidos aos ímãs permanentes, onde o efeito da reação de armadura sobre a tensão gerada é considerado, bem como o efeito desmagnetizante da mesma, sobre o estado dos ímãs.

Adicionalmente, nas instalações isoladas com pequenos geradores eólicos é comum o uso de banco de baterias para o armazenamento de energia excedente. Nesses casos, usualmente, a saída do gerador é retificada e conectada a um barramento C.C., onde inclusive podem existir outros geradores ou outras fontes de

energias alternativas. A contribuição da carga do gerador com ímãs permanentes para este barramento torna-se então um aspecto importante, especialmente em condições transitórias de sobre-carga ou sobre-velocidade. Outro aspecto importante é que este estudo representa uma máquina com fluxo magnético radial com rotor externo e ímãs que constituem pólos salientes. Há estudos com outro tipo de direção de fluxo magnético, o axial. O primeiro, é pertinente ao estudo deste trabalho, apresenta pólos magnéticos fixos ao rotor o qual encontra-se externo ao estator; assim há a circulação do fluxo magnético partindo dos ímãs, atravessando o entreferro, permeando as lâminas do estator, novamente pelo entreferro e pólos adjacentes e através da coroa do rotor ocorre novamente o ciclo descrito. Desta forma, fica caracterizado um circuito magnético que propicia ao fluxo um caminho radial. Outra alternativa é para circuitos magnéticos [2] que propiciam ao fluxo um caminho axial [3]. Outras inúmeras opções de montagens, como com rotor interno ao estator [4], ímãs enterrados ou na superfície, são realizadas como variantes de projetos conforme necessidade e conveniência.

1.2 Fenômeno físico

Todos os materiais magnéticos possuem comportamento baseado na relação entre densidade de fluxo magnético e intensidade de campo magnético [5], conforme mostrado na Figura 1. Nessa figura apresenta-se como “curva inicial” o início da magnetização de um material magnético, ou seja, a partir de uma amostra desmagnetizada o gráfico é traçado. Verifica-se que a curva de desmagnetização e a de magnetização constituem um ciclo, conhecido como Ciclo de Histerese, na qual se define grandezas de materiais magnéticos, tais como valor remanente da densidade de fluxo magnético (B_r), valor da intensidade de campo magnético coercivo (H_c) dentre outros. Neste caso, as grandezas citadas acima são as relevantes ao estudo.

Figura 1 – Curva de desmagnetização, de retorno e de permeabilidade

Considerando que o material em questão é um ímã permanente, o que é pertinente ao estudo, e que esse se encontra desmagnetizado como condição inicial para obtenção da Figura 1, observa-se que a “Curva inicial” citada ocorre até atingir o ponto Z. A partir deste e continuando a incrementar o valor do campo magnético (H), o ponto de magnetização do material possuirá a trajetória representada pela curva a partir do ponto Z. Quando ocorrer o decremento do valor do campo magnético inicial, o ponto de magnetização descreverá a trajetória descrita pela curva contínua a partir do ponto Z, passando pelo ponto B_r , denominada curva de desmagnetização, [6] até o ponto $-H_c$, sendo esse definido por campo magnético coercivo. A partir deste valor a trajetória descrita será a apresentada pela curva até o ponto Z' . Novamente, incrementando a intensidade de campo magnético, o ponto de magnetização do material estudado descreverá a trajetória apresentada pela curva iniciando pelo ponto Z' até o ponto H_c , continuando até atingir novamente o ponto Z. Desta forma, tem-se caracterizado o Ciclo de Histerese deste material.

O segmento de reta $\overline{OP}$ representa a curva de permeabilidade do circuito magnético estudado. No ponto de intersecção entre a curva de desmagnetização no segundo quadrante e o segmento de reta citado, obtém-se o “ponto de operação” (A') dos ímãs no circuito magnético estudado. Aumentando em módulo o valor da

intensidade do campo magnético tendendo a $-H_c$ a trajetória descrita pelo ponto de operação será a apresentada na Figura 1 partindo do ponto original A' até o ponto A . A partir deste, mesmo com a retirada da carga, ou seja, com o valor da intensidade de campo magnético não mais tendendo ao ponto $-H_c$ a trajetória a ser percorrida pelo ponto de operação será a apresentada pelo segmento de reta $\overline{AQ}$, isto é, a desmagnetização parcial dos pólos constituídos por ímãs é caracterizada pelo deslocamento do ponto de operação original para o ponto Q . Este mesmo procedimento representa o segmento de reta $\overline{DQ'}$ caso o valor da intensidade de campo magnético tenda ao valor $-H_c$.

1.2.1 Reação de armadura

Conforme mostrado na Figura 2, o pólo magnético da máquina constituído por ímãs permanentes produz, através de seu fluxo magnético, a indução nos condutores da bobina do estator apresentados de maneira a exemplificar o fenômeno [7]. Verifica-se que o campo magnético induzido provindo dos condutores da bobina realiza uma circulação que tende a produzir um campo em sentido oposto ao lado esquerdo do pólo magnético, a partir de uma vista frontal e o fenômeno oposto no lado direito do mesmo pólo.

Figura 2 – Exemplo da circulação do campo magnético induzido

Considerando o componente resultante dos campos magnético concatenados, verifica-se que a partir de vista frontal, conforme apresentado nas Figuras 2 e 3, há a tendência da diminuição do campo magnético gerado pelo lado esquerdo do pólo da máquina, pois o sentido da circulação do campo magnético deste apresenta-se contrário ao gerado pelo enrolamento do estator. Efeito contrário ocorre no lado direito do pólo exemplificado, pois o campo magnético gerado por este pólo apresenta mesmo sentido do gerado pelo enrolamento tendendo a incrementar a intensidade de campo gerada.

Figura 3 – Exemplo da magnetização final considerando o fenômeno de reação de armadura

Este fenômeno é mostrado com o deslocamento do segmento de reta $\overline{OP}$ que representa a curva de permeabilidade sobre o eixo das abscissas para a esquerda na Figura 1, já que a curva apresentada representa a operação do circuito em vazio. Quando a intersecção desta curva atingir o “joelho” da curva entre os pontos B_r e $-H_c$ no segundo quadrante, o retorno do ponto de intersecção entre as curvas é exemplificado pelo segmento $\overline{AC}$. Caso o valor do campo magnético continue tendendo ao valor de $-H_c$, o exemplo apresentado pelo segmento de reta $\overline{DE}$ mostra o efeito.

Após a retirada da carga, os ímãs constituintes dos pólos que sofreram desmagnetização permanecerão nesta condição até que sejam submetidos à nova magnetização através de equipamento apropriado. Os ímãs que sofreram acréscimo em sua magnetização inicial retornarão ao valor original desta, pois o material já estava plenamente magnetizado e não possuía propriedades físicas para suportar tal incremento. A consequência deste fenômeno pode variar desde a queda na tensão gerada com carga aplicada, até a alteração da magnetização dos ímãs da máquina.

1.3 Objetivo

O objetivo é estabelecer uma metodologia de análise e cálculo da variação de tensão gerada com a carga acoplada a partir de um protótipo de gerador constituído de ímãs permanentes, observando concomitantemente os efeitos causados sobre a magnetização dos ímãs, confrontando dados obtidos a partir do ensaio do protótipo e os cálculos analíticos desenvolvidos.

2. PROJETO DO GERADOR DE ÍMÃS PERMANENTES

2.1 Considerações iniciais

O gerador analisado neste trabalho foi originalmente concebido para uso como gerador eólico, com potência nominal de 400 W, rotação de 1000 RPM e podendo chegar a uma potência máxima de 800 W com rotação de 1300 RPM. Esses são, portanto, os dados de entrada para o projeto do gerador, cujas vistas em corte esquemático são mostradas nas Figuras 4 e 7. Um outro fator limitante do projeto é o requisito de baixo custo geral do sistema.

Figura 4 – Ilustração do gerador desenvolvido

As dimensões básicas foram adotadas a partir da escolha das lâminas do estator interno ao rotor. Tais lâminas são disponíveis comercialmente (fabricante –

Tessin Ind. e Com. Ltda.) e amplamente utilizadas em ventiladores de teto, tendo sido adotadas por razões de baixo custo. A espessura destas lâminas é de 0,60 mm e constituída de aço 1006, conforme Figura 5.

Figura 5 – Desenho da lâmina utilizada no estator

Possuindo estas lâminas 32 ranhuras, adotou-se uma configuração do enrolamento com 4 fases e oito pólos, resultando em uma distribuição de 1 ranhura por pólo por fase, com pólos consecuentes. O enrolamento tetrafásico foi adotado visando, essencialmente, um melhor aproveitamento da estrutura disponível (quanto maior o número de fases, maior a potência disponível para um dado volume do gerador a uma determinada velocidade). Também foi levado em conta que a saída seria retificada e, com maior número de fases, minimiza-se a ondulação da tensão. O número de pólos igual a 8 foi adotado em função da minimização de massa da coroa externa. As demais propriedades do enrolamento são resultantes da particular geometria da lâmina adotada. Os pólos de excitação são constituídos de ímãs prismáticos de ferrite, dado que essa solução é a de menor custo.

2.2 Saída do gerador

Este gerador possui saída retificada para operação em paralelo com banco de baterias ou com barramento C.C.. A Figura 6 apresenta o diagrama de ligações. Esse esquema é equivalente a uma ponte retificadora de onda completa de 4 braços, utilizando-se, porém, de pontes retificadoras padronizadas disponíveis no mercado.

Figura 6 – Diagrama de ligações do gerador quadrifásico

Nessa configuração as relações das tensões e correntes entre lado retificado e o lado alternado, supondo forma de onda senoidal, são as seguintes:

$$V_{CC} = 8/\pi \cdot V_f \quad (2.1)$$

e

$$I_{CC} = \sqrt{2} \cdot I_f \quad (2.2)$$

sendo V_f e I_f , respectivamente, a tensão e corrente por fase do gerador, V_{CC} a tensão retificada de cada fase e I_{CC} a corrente retificada de cada fase.

2.3 Dimensionamento analítico do protótipo – determinação do volume da parte ativa

Dados referentes à operação em condições normais (regime):

$$P = 400 \text{ W} , \omega = 1000 \text{ RPM} , V_0 = 350 \text{ Vcc}$$

$$f = 66,6 \text{ Hz}$$

Dados referentes à operação em condições de pico (para efeito de dimensionamento da parte ativa):

$$P = 800 \text{ W} ; \omega = 1300 \text{ RPM} ;$$

$$f = 86,6 \text{ Hz}$$

Considerando o diâmetro do estator interno ao rotor com o valor de 161,2mm, a partir das lâminas mencionadas, adota-se a utilização de ímãs de ferrite de estrôncio com densidade de campo magnético (Br) da ordem de 0,39 T. É possível realizar o cálculo da densidade de fluxo magnético no entreferro [8], mas realizou-se o dimensionamento adotando valores para a densidade de fluxo no entreferro, bem como de carregamento elétrico equivalente na superfície deste. Isto porque admite-se que o circuito magnético a ser estudado não possui saturação e sua curva de carga possui característica de uma reta até a condição de operação em carga máxima.

A partir dos dados acima admite-se como referência:

$$B_g \approx 0,25 \text{ T}$$

$$q \approx 15000 \text{ Acond/m}$$

sendo B_g a densidade de campo magnético máximo no entreferro e q a densidade linear de corrente. Considerou-se constante a temperatura em todos os componentes do circuito magnético.

Para calcular o conjugado [9] a partir dos valores de referência utiliza-se a equação a seguir:

$$C = \frac{2}{\pi} B_g \frac{D}{2} L_{\text{médio}} Z_c \quad (2.3)$$

sendo D o diâmetro no entreferro, Z_c a quantidade total de condutores dispostos na periferia do entreferro, L o comprimento do pacote de lâminas do estator e $i_{\text{médio}}$ o valor médio da corrente nos condutores, supondo forma de onda senoidal.

Multiplicando e dividindo (2.3) pelo termo $\pi.D$, tem-se

$$C = \frac{2}{\pi} B_g \frac{D}{2} L i_{\text{médio}} Z_c \frac{\pi D}{\pi D} = \frac{2}{\pi} B_g \frac{D}{2} L \frac{2\sqrt{2}}{\pi} i_{\text{ef}} Z_c \frac{\pi D}{\pi D} , \quad (2.4)$$

sendo i_{ef} o valor eficaz da corrente nos condutores e $q = \frac{i_{\text{ef}} Z_c}{\pi D}$ definido como densidade linear de corrente, resulta

$$C = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} B_g q D^2 L . \quad (2.5)$$

A partir da equação acima, pode-se calcular a potência a ser desenvolvida pela máquina, como:

$$P = C\omega = \left[\frac{2\sqrt{2}}{\pi} B_g q D^2 L \right] 2\pi n \quad (2.6)$$

Definindo o valor do produto $D^2 L$ a partir dos dados admitidos, tem-se

$$P = (4\sqrt{2} B_g q) D^2 L n = C_0 D^2 L n$$

$$P = C_0 D^2 L n \Rightarrow D^2 L = \frac{P}{C_0 n} \quad (2.7)$$

em que C_0 é o torque específico da máquina. Para os carregamentos elétricos e magnéticos adotados, tem-se:

$$C_0 = 4 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,25 \cdot 15000 = 21213 \text{ N.m/m}^3$$

Admitindo regime de operação em carga máxima, conforme apresentado na seção 2.1, tem-se:

$$D^2 L = \frac{P}{C_0 n} = \frac{800}{21213 \cdot \left(\frac{1300}{60}\right)} .$$

Fixando o valor de $D = 161,2 \text{ mm}$, obtém-se o comprimento do pacote de lâminas:

$$L \approx 70 \text{ mm}$$

Apresenta-se então um gerador com rotor externo, sendo o diâmetro interno do mesmo de $164,2 \text{ mm}$, já considerando um entreferro adotado de $1,5 \text{ mm}$. A altura adotada dos ímãs foi 10 mm (valor padrão dos ímãs prismáticos convencionais), resultando assim nas dimensões indicadas na Figura 1. A Figura 7 apresenta uma vista explodida e em corte do conjunto.

Figura 7 – Vista explodida e em corte longitudinal do gerador

Nas Figuras 8 e 9 é indicado o circuito magnético em maiores detalhes. A lâmina do estator interno é estampada em aço SAE 1006.

Figura 8 – Apresentação em corte de um setor do circuito magnético

Figura 9 – Apresentação das dimensões utilizadas no circuito magnético

2.4 Caracterização dos ímãs utilizados

Com o auxílio de um equipamento apropriado (permeâmetro) procedeu-se ao ensaio para caracterização de uma amostra dos ímãs montados no protótipo desenvolvido, conforme apresentado pela Figura 10. Esta necessidade justifica-se para a posterior definição dos pontos de operação do gerador estudado, os quais serão obtidos graficamente a partir da intersecção da curva característica do ímã com a curva de carga do circuito magnético referida ao ímã. Para maior confiabilidade do experimento, foi solicitado para o distribuidor dos ímãs utilizados um ensaio de caracterização do mesmo. Verificou-se que ambos os ensaios possuíam ciclos de Histerese idênticos o que confirmou as informações obtidas.

Figura 10 – Ciclo de Histerese do ímã estudado (ferrite de estrôncio)

2.5 Procedimento para obtenção do ponto de operação do circuito magnético do gerador

Apresentam-se a seguir os cálculos para obtenção do ponto de operação do gerador, cujo circuito magnético é apresentado nas Figuras 4, 8 e 9. A partir de dois valores de fluxo magnético, sendo o primeiro igual a metade do valor total do fluxo de um ímã do pólo e o segundo, igual ao valor máximo. Graficamente, obtém-se uma reta onde se determina o ponto de operação correspondente ao circuito magnético, o quais definirão uma curva de carga do mesmo em vazio.

O ponto de operação é definido pela intersecção entre duas curvas, sendo a primeira apresentada pelo Ciclo de Histerese do ímã e a segunda obtida a partir dos dois pontos obtidos com valores de fluxo citado. Com as coordenadas do ponto de operação, refere-se ao ímã permanente do pólo magnético o valor da intensidade de campo magnético. O efeito da reação de armadura é computado posteriormente, deslocando-se a curva característica do circuito magnético no segundo quadrante da curva do ímã.

Como este circuito magnético excitado por ímãs de ferrite apresenta normalmente baixos valores de indução nas partes de ferro, a saturação é pouco pronunciada e a curva de carga do circuito magnético pode ser obtida por apenas dois pontos, além da origem.

Adotando-se $\Phi_p = 0,56 \text{ mWb}$ como primeiro valor escolhido de fluxo por pólo, para cálculo da densidade de fluxo magnético do entreferro B_g , tem-se:

$$B_g = \frac{\Phi_p}{\tau_p L_i K_f} \quad (2.8)$$

em que $\tau_p = \pi D / 2p$, $D = 161,20 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ é o diâmetro e p o número de pares de pólos.

$$K_f = \frac{B_{\text{médio}}}{B_{\text{pico}}} \approx 2 / \pi = 0,637 \text{ é definido como fator de forma de distribuição do}$$

campo no entreferro, admitindo forma de onda senoidal.

$L_i = \text{comprimento dos ímãs do pólo} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, então:

$$B_g = 0,20 \text{ T}$$

Com os dados acima pode-se calcular o valor da força magnetomotriz no entreferro:

$$F_g = \frac{B_g}{\mu_0} \cdot l_g \cdot K_g, \quad (2.9)$$

sendo l_g o comprimento do entreferro que vale $1,5 \cdot 10^{-3}$ m e K_g o fator de Carter [9]. Este é definido por

$$K_g = \frac{\tau_s}{\tau_s - l_g \cdot \delta} \quad (2.10)$$

e

$$\delta = \frac{(b_s/l_g)^2}{5 + b_s/l_g}. \quad (2.11)$$

Define-se b_s a abertura da ranhura com valor igual a $2,5 \cdot 10^{-3}$ m. Então,

$$\delta = 0,42.$$

Há outras formas de cálculo do fator de Carter, conforme o tipo de máquina envolvida [10], mas para este caso, utilizou-se o cálculo apresentado pelo autor citado em [9], conforme equações 2.10 e 2.11. Para o cálculo do fator de Carter, tem-se:

τ_s = Passo de Ranhura, mostrado na Figura 8 e que pode ser calculado com a equação

$$\tau_s = \frac{2\pi R}{n^\circ \text{ranhuras}}, \quad (2.12)$$

onde o número de ranhuras é 32 e R é o raio da lâmina metálica que constitui o pacote do estator, com valor de $80,6 \cdot 10^{-3}$ m, tem-se,

$$\tau_s = 15,90 \cdot 10^{-3} \text{ m}.$$

Então,

$$K_g = 1,04.$$

Com os dados acima, pode-se calcular a força magnetomotriz no entreferro para o valor de densidade de fluxo magnético anteriormente obtido (B_g):

$$F_g = 248,30 \text{ A}_e.$$

Calculando-se a densidade de fluxo magnético no dente do estator (B_{ds}), tem-se:

$$B_{ds} = \frac{\Phi_p}{b_{ds} L_d F_e \left(\frac{N_d}{2P}\right) K_f} \quad (2.13)$$

onde:

b_{ds} = largura do dente = 5mm

L_d = comprimento de um dente do estator = $70 \cdot 10^{-3}$ m

F_e = fator de empilhamento = 0,95 (adotado)

N_d = número de dentes = 32

P = número de pares pólos = 4

Substituindo os valores, tem-se:

$$B_{ds} = 0,661 \text{ T}$$

A partir da curva característica entre $B \times H$ do material das lâminas (SAE 1006), obtém-se o valor da intensidade de campo magnético, ou seja:

$$H_{ds} = 349 \text{ A/m.}$$

Obtém-se então:

$$F_{ds} = H_{ds} \cdot l_{ds},$$

sendo l_{ds} a altura de um dente do estator a ser percorrido pelo fluxo magnético

$$l_{ds} \approx 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Então:

$$F_{ds} = 10,5 \text{ Ae.}$$

Calculando-se a densidade de fluxo magnético na coroa do estator (B_{cs}), tem-se:

$$B_{cs} = \frac{\Phi_p / 2}{b_{cs} l_{cs}} \quad (2.14)$$

onde:

b_{cs} = largura da coroa $\approx 9 \cdot 10^{-3}$ m

l_{cs} = comprimento da coroa = $75 \cdot 10^{-3}$ m

Substituindo os valores, tem-se:

$$B_{cs} = 0,42 \text{ T}$$

A partir da curva característica entre BxH do material da coroa (SAE 1020), obtém-se o valor da intensidade de campo magnético,

$$H_{cs} = 257,0 \text{ A/m}$$

Em posse do valor da intensidade de campo magnético calculado na coroa do estator, H_{cs} , pode-se calcular a força magnetomotriz respectiva:

$$F_{cs} = H_{cs} \cdot l_{cs}$$

sendo l_{cs} o comprimento da circuitação na coroa do estator:

$$l_{cs} \approx 23 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

tem-se, portanto:

$$F_{cs} = 5,9 \text{ Ae.}$$

Calculando-se a densidade de fluxo magnético na coroa do rotor, B_{cr} , admitindo este com valor máximo em todo o comprimento da coroa mencionada, tem-se:

$$B_{cr} = \frac{\Phi_p/2}{b_{cr} \cdot L_{cr}} \quad (2.15)$$

onde,

$$b_{cr} = \text{espessura da coroa do rotor} \approx 8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L_{cr} = \text{comprimento da coroa do rotor} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$B_{cr} = 0,47 \text{ T}$$

A partir da curva característica entre BxH do material da coroa, obtém-se o valor da intensidade de campo magnético, ou seja:

$$H_{cr} = 300,0 \text{ A/m}$$

Com o valor da intensidade de campo magnético calculado na coroa do rotor, H_c , pode-se calcular a força magnetomotriz respectiva:

$$F_{cr} = H_{cr} \cdot l_{cr}$$

sendo l_{cr} o comprimento da circuitação na coroa do rotor,

$$l_{cr} \approx 42 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

então:

$$F_{cr} = 12,60 A_e.$$

Portanto, pode-se calcular a força magnetomotriz total solicitada do ímã através da soma dos valores obtidos de forças magnetomotrizes em cada trecho do circuito magnético do gerador estudado:

$$F_{total} = F_{cr} + F_{cs} + F_{ds} + F_g$$

$$F_{total} = 277,3 A_e$$

Sendo o gerador estudado constituído por pólos de ímãs permanentes, atribui-se a esses a fonte do fluxo magnético. Desta maneira, refere-se, em módulo, ao ímã o requisito de excitação do circuito magnético:

$$F_{total} = F_{ímã}$$

ainda:

$$F_{ímã} = H_{ímã} \cdot l_{ímã}$$

onde:

$$l_{ímã} = \text{espessura do ímã} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$H_{ímã} = F_{ímã} / l_{ímã}$$

Portanto:

$$H_{ímã} = 27,73 \text{ kA/m}$$

A densidade de fluxo magnético fornecida pelo ímã é dada por:

$$B_{ímã} = \frac{\Phi_{ímã}}{S_{ímã}} \quad (2.16)$$

sendo $S_{ímã} = (8,5 \times 75,0) 10^{-3} \text{ m}^2 = 637,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ e $\Phi_{ímã} = \Phi_p / (\text{n}^\circ \text{ de ímãs}) = 0,56 \cdot 10^{-3} / 5 = 0,112 \text{ mWb}$;

portanto:

$$B_{ímã} \cong 0,18 \text{ T}.$$

Adotando-se $\Phi_p = 1,12$ mWb como segundo valor arbitrado de fluxo magnético por pólo, desenvolve-se a mesma metodologia de cálculo utilizada para primeiro valor de fluxo magnético por pólo, obtendo-se ao final o novo valor referido aos ímãs:

$$H_{\text{ímã}} = 60,80 \text{ kA/m}$$

Conforme (2.16), calcula-se o valor da densidade de fluxo magnético ($B_{\text{ímã}}$):

$$B_{\text{ímã}} \cong 0,38 \text{ T}$$

Com as coordenadas dos pontos calculados (27,73 kA/m ; 0,18 T) e (60,80 kA/m ; 0,38 T), pode-se traçar a curva de carga do circuito magnético em vazio da máquina estudada, conforme mostrado na Figura 11. Sua intersecção com a curva característica do ímã define o ponto de operação em vazio do circuito magnético com os correspondentes valores de densidade de fluxo magnético no ímã e no entreferro e, portanto, o fluxo de operação do gerador em vazio.

Da Figura 11 resulta $B_{\text{ímã}} = 0,312$ T. A partir do valor obtido da densidade de fluxo magnético no ímã, calcula-se o fluxo magnético em um pólo (2.16), que para operação em vazio tem valor 0,994 mWb. A densidade do campo magnético no entreferro, conforme (2.8) fica então $B_g = 0,33$ T.

Figura 11 – Ponto de operação calculado, para o gerador em vazio

2.6 Cálculo das bobinas do gerador e tensões geradas

Com as considerações iniciais de projeto e os resultados do circuito magnético, torna-se possível determinar o número de espiras por bobina para cada fase.

A tensão nominal especificada é 350 Vcc, já retificada.

Usando a equação (2.1), resulta então:

$$V_f = \text{tensão por fase} = 138 \text{ V}$$

Considerando a potência de operação de pico de 800W, tem-se usando a equação (2.2):

$$I_{cc} = 2,30 \text{ A} \quad \therefore \quad I_{ac} = 1,79 \text{ A}$$

A relação entre tensão gerada e fluxo [9] é dada por:

$$E = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot N_f \cdot K_e \cdot \Phi_p \quad (2.17)$$

onde:

$$f = \text{frequência} = 66,6 \text{ Hz}$$

N_f = número de espiras

K_e = fator de enrolamento = 0,894 (já considerando inclinação das ranhuras)

Φ_p = Fluxo magnético por pólo = $0,994 \cdot 10^{-3}$ Wb (resultado do cálculo do circuito magnético)

Portanto:

$N_f = 565 \approx 560$ espiras/fase. Este valor de arredondamento é devido ao número de fases do gerador que é 4. Desta forma, há a possibilidade de 140 espiras/bobina, sendo o total de 4 bobinas por fase conectadas em série.

Considerando o gerador sem ventilação forçada e a corrente de pico, adotou-se o condutor com $0,40 \text{ mm}^2$ de seção transversal, formado pelo conjunto de 2 condutores de 24 AWG, bobinados em paralelo. Isto porque o trabalho de desenvolvimento das bobinas e inserção nas ranhuras do estator torna-se menor se comparado ao trabalho com um único condutor com bitola nominal equivalente. Considerou-se aceitável, por se tratar de uma máquina elétrica sem ventilação forçada, o valor de $2,27 \text{ A/mm}^2$ como densidade de corrente para potência nominal e $4,48 \text{ A/mm}^2$ para potência máxima.

2.7 Efeitos da reação de armadura

A força magnetomotriz da reação de armadura produzida pela corrente de carga do gerador é dada por [9]:

$$F_A = \frac{\sqrt{2} \cdot m \cdot N_f \cdot K_e \cdot I}{\pi \cdot p} \quad (2.18)$$

onde:

m = número de fases do enrolamento

N_f = número de espiras por fase (em série) = 560

K_e = fator de enrolamento = 0,894 (já considerando a inclinação das ranhuras e componente fundamental senoidal)

I = corrente elétrica por fase (definida pela carga aplicada)

p = pares de pólos do gerador = 4

Considerando os valores de corrente referentes à condição nominal de carga definida por $I_1 = 0,91$ A e também à condição de pico de carga definida por $I_2 = 1,79$ A, pode-se obter a intensidade da reação de armadura (2.18) para cada um destes:

$F_{A1} = 205,1$ A_e/pólo que é referente ao valor de corrente para carga nominal aplicada.

$F_{A2} = 403,1$ A_e/pólo que é referente ao valor de corrente para pico de carga aplicada.

Para se quantificar o efeito de desmagnetização provocada pela reação de armadura, considerando seu valor máximo, as forças magnetomotrizes criadas pela corrente do estator, devem ser referidas ao ímã, correspondendo a uma intensidade de campo magnético equivalente, que somadas com aquela correspondente ao ponto de operação do ímã resulta em um novo ponto de intersecção sobre a característica dos ímãs, definindo um novo ponto de operação.

Então, referindo aos ímãs e sobrepondo os valores obtidos de F_A resultam os valores correspondentes das intensidades de campo magnético:

$$H_{1 \text{ ímã}} = 20,51 \text{ kA/m}$$

$$H_{2 \text{ ímã}} = 40,34 \text{ kA/m}$$

Com o auxílio da Figura 12 podem-se obter os valores da densidade de fluxo magnético resultante em carga, graficamente como segue:

Figura 12 – Pontos de operação calculados para as condições: em vazio, carga nominal e carga máxima

Com os novos valores de densidade de fluxo magnético resultantes em carga, obtém-se:

Em vazio: $B_0 = 0,31$ T; em carga nominal: $B_1 = 0,29$ T; em pico de carga: $B_2 = 0,27$ T

A tensão interna gerada por fase em cada ponto estudado pode ser determinada utilizando a equação (2.17):

$$E_0 = \text{tensão em vazio} = 136,70 \text{ V/fase}$$

Considerando a indutância e a resistência dos enrolamentos apresentados a seguir, calculadas em [9]:

$$X_d = \text{reatância de dispersão} = 27,39 \text{ } \Omega/\text{fase}$$

$$R_f = \text{resistência por fase} = 6,86 \text{ } \Omega/\text{fase}$$

A partir da equação (2.19) pode-se calcular a variação no fluxo magnético devido às variações do ponto de operação impostos pela reação de armadura, considerando esta última francamente desmagnetizante.

$$\Delta\Phi = [(\Phi_{\text{vazio}} - \Phi_{\text{carga}}) / \Phi_{\text{vazio}}] \cdot \Phi_p \quad (2.19)$$

À variação do fluxo associa-se a uma tensão equivalente da reação de armadura, E_A , calculada por:

$$E_A = \left(\frac{\Delta\Phi}{\Phi_p} \right) \cdot E_0 \text{ (V/fase)} \quad (2.20)$$

Essa tensão de reação de armadura está associada à parcela de magnetização referente à reatância síncrona, dada por:

$$X_{sm} = E_A / I$$

$$X_{sm} = 11,92 \, \Omega/\text{fase}, \text{ referente ao valor de corrente máxima.}$$

Resulta então a reatância síncrona total do gerador dada por:

$$X_s = X_{sm} + X_d$$

$$X_s = 39,31 \, \Omega/\text{fase}.$$

Considerando agora que a saída do gerador é retificada e, portanto, o fator de potência é praticamente unitário ($\cos \varphi = 1$), conforme Figura 13, tem-se a tensão terminal do gerador:

$$V = \sqrt{E_0^2 - (X_s \cdot I)^2} - R_f \cdot I \quad (2.21)$$

Figura 13 – Diagrama fasorial das componentes elétricas do gerador estudado

Observe que o diagrama da Figura 13 é apresentado de maneira genérica, referente à carga com característica resistiva.

A Tabela 1 mostra os resultados para três pontos de operação.

Corrente de fase (A)	Reação de armadura (A_e /pólo)	Campo magnético no ponto de operação (kA/m)	Densidade de campo magnético no ponto de operação (T)	Tensão de fase (V)
0	0	52,0	0,31	136,7
0,91	205,1	68,5	0,29	126,1
1,79	403,4	85,2	0,27	101,8

Tabela 1 - Valores teóricos para as seguintes condições de operação: em vazio, em carga nominal e em carga máxima

Com esse procedimento torna-se possível então determinar a tensão do gerador para qualquer carga e qualquer velocidade.

Após a condição de carga máxima, considera-se que a tensão em vazio não sofrerá alteração, ou seja, admite-se que os ímãs componentes dos pólos magnéticos estão operando na região onde a desmagnetização devido à reação de armadura é totalmente reversível.

3. APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Objetivando-se validar a metodologia apresentada anteriormente, desenvolveu-se um gerador de ímãs permanentes para confrontação dos dados teóricos com os dados ensaiados no protótipo. Algumas considerações descritas a seguir são ilustradas pela Figura 14.

Utilizou-se como suporte uma viga de perfil “U” para fixação e alinhamento do conjunto. O gerador foi primeiramente fixado a uma cantoneira reforçada, sendo esta também utilizada para fixação e alinhamento do motor que aciona o protótipo. Utilizou-se um acoplamento flexível para facilitar o alinhamento do sistema. Durante as montagens inúmeros testes foram realizados e alguns cuidados foram tomados para que ocorresse o perfeito funcionamento do protótipo. Desenvolveu-se um desenho de conjunto em três dimensões para verificação da montagem. A partir das especificações deste, fabricou-se a coroa externa do rotor, em aço SAE 1020, com espessura de 8mm. A colagem dos ímãs realizou-se na coroa externa do rotor somente com a primeira peça de cada pólo para verificação do entreferro. Após este procedimento continuou-se a colagem dos ímãs, não dispensando certos cuidados para que houvesse uma homogeneidade na camada de cola entre os magnetos e também entre esses e o seu suporte, ou seja, a coroa de aço 1020. Todo o excesso de cola foi cuidadosamente retirado para que não influenciasse no valor do entreferro. Também foram necessárias algumas técnicas de posicionamento dos ímãs para que esses permanecessem fixos em posições ideais até que ocorresse a secagem da cola do sistema. Após cada implantação finalizada dos pólos constituídos pelos ímãs, utilizou-se um fluxímetro digital para ensaio de medição do fluxo magnético de cada pólo em vazio, com objetivo de comparação de valores entre os pólos, objetivando evitar diferentes valores de fluxo magnético gerado devido a qualquer problema durante as montagens.

Paralelamente a esta montagem, realizou-se o desenvolvimento do molde em madeira onde ocorreu o enrolamento das bobinas. Após algumas adequações chegou-se a um formato ideal de carretel. Também foram necessárias técnicas para inserção das bobinas nas ranhuras das lâminas do estator, pois cada uma deveria ser instalada em um conjunto de duas ranhuras, sendo uma com profundidade

pequena e outra com profundidade maior. A de maior profundidade apresentou dificuldade para inserção das bobinas, principalmente quando realizada a finalização e fixação da bobina.

Após as montagens parciais iniciou-se a montagem do conjunto. Houve então a detecção de um último empecilho: a necessidade de desenvolvimento de um cilindro que centralizasse a parte fixa em relação à parte móvel, permitindo a inserção do conjunto constituído pelo rotor, tampa frontal e eixo, que constituem o conjunto girante, dentro do estator, constituído pelas bobinas e os rolamentos. Desenvolveu-se um cilindro que preencheria o espaço entre o orifício central do conjunto do estator e o eixo, de forma a permitir que a inserção não provocasse o choque dos ímãs com as lâminas do estator. Assim tornou-se simples o manuseio do conjunto, sempre que necessário, sem risco de ocorrerem danos aos conjuntos parciais a serem montados ou desmontados.

Foto durante a montagem

Verificação do entreferro

Ensaio de medição do fluxo magnético dos pólos

Carretel desenvolvido em madeira, amostra de bobina sem instalação e estator montado

Inclinação de ranhuras

Protótipo montado e acoplado

Figura 14 - Apresentação do protótipo

4. ESTUDO DAS TENSÕES DO GERADOR

4.1 Análise de dados calculados e medidos no gerador estudado, sem retificação

Os dados apresentados na Tabela 1 referem-se aos valores calculados através do modelo analítico. A partir do ensaio realizado com o gerador desenvolvido, apresenta-se a seguir, com auxílio da Tabela 2, os valores obtidos experimentalmente.

A carga alimentada pelo gerador consiste em resistores idênticos (reostato quadrifásico), conforme Figura 15. A rotação utilizada nos ensaios foi fixada em 1000 RPM.

O ajuste dos valores dos dados experimentais das correntes apresentados na Tabela 2, foram realizados através da variação da carga resistiva acoplada ao gerador, visando aproximar-se ao máximo dos valores dos dados calculados. Após a obtenção de dados em carga no experimento, o protótipo é submetido novamente à condição em vazio, conforme Tabela 2.

Condição de operação	Dados calculados		Dados experimentais	
	Corrente de fase (A)	Tensão de fase (V)	Corrente de fase (A)	Tensão de fase (V)
Em vazio	0	136,7	0	142,0
Carga nominal	0,91	126,1	0,87	128,0
Carga máxima	1,79	101,8	1,95	105,2
Em vazio	0	136,7	0	141,9

Tabela 2 – Tabela comparativa de valores calculados e experimentais sem retificação e para as condições em vazio, com carga nominal e com carga máxima

Observa-se que a tensão de saída do gerador varia conforma a carga acoplada, a qual produz reação de armadura que causa este fenômeno. Após o ensaio com carga máxima, a condição em vazio é imposta ao protótipo e verifica-se que a tensão gerada retorna ao valor originalmente obtido experimentalmente, comprovando que os ímãs constituintes dos pólos magnéticos operam em condição sem desmagnetização permanente.

Figura 15 – Esquema de ligações para ensaio sem retificação

A seguir, apresentam-se na Figura 16 formas de onda de tensão obtidas experimentalmente nas quatro fases do gerador em vazio. Nas Figuras 17 e 18 as formas de onda de tensão obtidas são referentes às condições de carga nominal e máxima, respectivamente. Todas as aquisições de dados foram realizadas entre fase e neutro (A1-N, B1-N, C1-N e D1-N, conforme Figura 15).

Na Figura 16 é apresentado o valor obtido experimentalmente da frequência da tensão gerada, ou seja, 66,4 Hz (1000 RPM = 16,6 Hz multiplicado pelo número de pares de pólos) para demonstrar que os ensaios ocorreram sempre na mesma condição de rotação.

Ainda referente à Figura 16, nos canais de aquisição de dados através de osciloscópio, utilizou-se as seguintes pontas de prova para obtenção das formas de onda de todas as fases do gerador simultaneamente: ponta de prova com fator multiplicativo unitário para o Canal 1 (C1) e as utilizadas para medição do Canal 2 (C2), Canal 3 (C3) e Canal 4 (C4) com fator multiplicativo de 10.

Figura 16 – Formas de ondas experimentais das tensões geradas em todas as fases apresentadas simultaneamente

Pode-se verificar que a forma de onda da tensão é praticamente senoidal com defasagem entre fases de 90° elétricos. As tensões são equilibradas, permitindo assim que os ensaios possam ser monitorados em uma única fase. Monitorou-se a fase A utilizando ponta de prova com fator multiplicativo igual a 100, conforme Figuras 17 e 18. Apresenta-se adicionalmente, a forma de onda do sensor óptico no Canal 2 (C2), monitorando a rotação do eixo do gerador para demonstrar que esta se encontra próxima ao valor estabelecido, ou seja, 16,6 Hz (1000 RPM).

Figura 17 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em condição nominal de carga e sinal da rotação do eixo do rotor

Figura 18 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em condição máxima de carga e sinal da rotação do eixo do rotor

Com os dados obtidos tem-se um gráfico comparativo entre valores medidos e calculados, conforme Figura 19:

Figura 19 – Valores comparativos entre dados experimentais e teóricos

4.2 Análise de dados calculados e medidos no ensaio do gerador estudado com retificação

Agora, realizando o ensaio conforme configuração apresentada na Figura 6, observa-se distorções nas formas de onda de tensão obtidas para as condições em carga, devido ao tipo de retificação utilizada, conforme demonstrado nas Figuras 20, 21 e 22. As formas de onda apresentadas foram obtidas na saída do gerador antes dos retificadores. O procedimento experimental para obtenção dos dados à seguir foi o mesmo realizado para a configuração de ensaio sem a retificação da tensão e da corrente gerados, alterando somente o coeficiente multiplicativo para 10, no Canal 1 (C1) que monitorou a tensão na fase A. Neste caso, após os dados obtidos em condições de carga, impôs-se a condição em vazio e observou-se também a geração do valor de tensão original em vazio.

Figura 20 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em vazio de carga, com retificador acoplado e sinal da rotação do eixo do rotor

Figura 21 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em condição de carga nominal, com retificador acoplado e sinal da rotação do eixo do rotor

Figura 22 – Forma de onda experimental da tensão na fase A em condição de carga máxima, com retificador acoplado e sinal da rotação do eixo do rotor

Com os dados apresentados obtém-se o gráfico comparativo entre valores experimentais e calculados, conforme Figura 23.

Figura 23 – Dados comparativos entre valores teóricos e experimentais de tensão de saída do gerador com retificação (onda completa) e rotação de 1000 RPM

Os dados experimentais demonstram queda de tensão em relação aos calculados, devido ao aparecimento de componentes harmônicos, gerados pelo chaveamento dos diodos do retificador. Neste caso o fenômeno devido ao ângulo de comutação que há entre os diodos retificadores apresenta-se como fator relevante na obtenção de dados. Este fenômeno é apresentado com mais detalhes no item 4.3, onde são apresentadas suas consequências. A seguir apresentam-se os espectros com os valores dos componentes harmônicos causadas pelos retificadores, conforme Figuras 24, 25, 26.

Figura 24 – Espectro dos componentes harmônicos presentes na forma de onda da tensão, obtido com leituras entre os pontos A1 e N para a condição em vazio, entre 0 e 1,6 kHz

Figura 25 – Espectro dos componentes harmônicos presentes na forma de onda da tensão, obtido com leituras entre os pontos A1 e N, em condição em carga nominal entre 0 e 1,6 kHz

Figura 26 – Espectro dos componentes harmônicos presentes na forma de onda da tensão, obtido com leituras entre os pontos A1 e N, em condição em carga máxima entre 0 e 1,6 kHz

4.3 Fenômeno de comutação entre diodos retificadores

O retificador utilizado neste experimento pode ser caracterizado por “comutação simples em circuito retificador polifásico não controlado de dois caminhos”, [11] uma vez que entende-se por “comutação simples” [7] somente quando há comutação entre diodos de duas fases. O protótipo apresentado é acoplado a um retificador de quatro fases com retificação de onda completa, sendo os elementos retificadores constituídos por diodos comerciais (pontes bifásicas retificadoras) as quais não possuem controle do ângulo de disparo de condução. O fenômeno que ocasiona a queda de tensão após o retificador é caracterizado pela ocorrência de condução entre diodos de fases diferentes por um período “ μ ”, denominado ângulo de comutação conforme apresentado na figura 27.

Figura 27 – Apresentação de formas de ondas em uma fonte polifásica com retificação não controlada com ângulo de comutação

A Figura 27 apresenta a sobreposição das curvas de tensão entre diodos de duas fases quando ambos estão em eminência de mudança de estado de operação. A consequência disto é a transferência não instantânea de corrente entre diodos de cada fase. Isto é causado devido à reatância dos enrolamentos da máquina, tornando o retificador acoplado ao gerador estudado em uma carga de comportamento não linear em função da reatância citada e da corrente.

Em futuros estudos relacionados a retificadores este caso pode ser estudado visando atenuar este fenômeno, que ocasiona queda da tensão retificada.

5. APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO EM PARALELISMO

5.1 Apresentação do ensaio

O ensaio foi realizado com a utilização de cinco multímetros, sendo um do tipo alicate-amperímetro. Desta forma, obtiveram-se os dados de corrente contínua das três fontes de energia, conforme Figura 28 e também da corrente absorvida pela carga assim como a tensão no barramento C.C.. Utilizou-se um capacitor eletrolítico de 2500 μ F / 350V para eliminar o “ripple” de tensão no barramento. A Figura 28 apresenta os principais componentes e equipamentos utilizados nos ensaios do paralelismo. No item 5.2 será apresentado a função dos equipamentos ilustrados, mas faz-se necessária apresentação prévia de alguns componentes auxiliares que também são apresentados na Figura 28. O osciloscópio de quatro canais realizou a aquisição das diversas formas de ondas e medições de grandezas pertinentes aos sinais obtidos. O “reostato” foi utilizado como carga resistiva para o ensaio do gerador com e sem o paralelismo de fontes elétricas. O “sensor óptico” foi utilizado para leitura do sinal de velocidade angular do protótipo, sendo este sinal encaminhado para o osciloscópio para obtenção das formas de onda. O outro componente auxiliar denominado “Painel de acionamento de carga”, foi montado e utilizado contendo as funções de proteção elétrica e chaveamento da alimentação das cargas.

Figura 28 – Equipamentos utilizados para realização do paralelismo

5.2 Aplicação prática do protótipo em sistema com paralelismo de fontes de energia

Desenvolveu-se um sistema conforme ilustrado na Figura 29 com algumas adaptações para facilitar a execução dos ensaios. A intenção foi desenvolver um conjunto que proporcionasse a simulação de trabalho do protótipo ensaiado, trabalhando em paralelo com outra fonte de energia.

Figura 29 – Circuito proposto para estudo de paralelismo

O objetivo deste ensaio é verificar o comportamento do protótipo quando operando em um sistema com outras fontes de energia elétrica em paralelo. O circuito proposto foi implantado conforme apresenta a Figura 30:

Figura 30 – Circuito montado para estudo de paralelismo

Realizando uma analogia entre o circuito proposto e o executado, tem-se a rede de energia convencional utilizando um variador de tensão (Variac) para obtenção de valor ideal de tensão para operação. No lugar do banco de baterias utilizou-se uma fonte C.C.. Tanto a energia proveniente da fonte alternativa (rede elétrica) como a fonte C.C. foram reguladas para produzir um nível C.C. no barramento de 210 V, valor esse que permite ao gerador apresentar seu desempenho em valores seguros de carga. A Figura 31 e a Tabela 3 apresentam o comportamento do gerador no sistema ensaiado:

Figura 31 – Gráfico demonstrativo entre valores de tensão com saída retificada com e sem paralelismo de fontes geradoras

Barramento (Vcc)	Fonte (Acc)	Rede (Acc)	Gerador (Acc)	Carga (Acc)
350,00	0	0	0	0
266,30	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	1,07	1,07
240,30	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	1,50	1,50
218,90	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$	2,03	2,03
208,40	0,29	0,29	2,21	2,79
208,40	0,84	0,86	2,23	3,95

Tabela 3 – Dados obtidos do paralelismo realizado

Como dado adicional, foi apresentada na Figura 31 a curva com os dados originais de tensão do gerador para que possa ser avaliado seu comportamento com

e sem paralelismo. Considera-se o comportamento do gerador durante o paralelismo satisfatório por apresentar dados coerentes com os obtidos conforme a configuração original apresentada na Figura 6.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do gerador com pólos constituídos por ímãs permanentes surgiu a partir dos cálculos utilizando a metodologia analítica, sem necessidade de utilização de programas simuladores, os quais demandam custo. Podem-se calcular pontos de operação de geradores desta configuração visando dimensionamento de suas partes integrantes, principalmente os valores máximos de carga aplicada que permitam a operação da máquina sem risco de desmagnetização dos ímãs.

Verificou-se a diferença nos valores calculados de tensão gerada quando em condição de operação em vazio, em carga nominal e em carga máxima, devido ao estado de magnetização em que os ímãs permanentes encontravam-se, proporcionando comparação de resultados teóricos e experimentais. Após o desenvolvimento experimental, para as condições com e sem retificação acoplada à saída do protótipo, verificou-se a variação da tensão gerada de acordo com a reação de armadura imposta por cada condição aplicada. Em todas estas condições, observou-se a que a tensão em vazio após o desacoplamento das cargas retornou ao mesmo valor antes da inserção destas, comprovando o desenvolvimento analítico proposto neste trabalho.

Quando houve a conexão do retificador não controlado à saída do gerador, observou-se discrepâncias entre os valores calculados e obtidos, devido à reatância de comutação do retificador utilizado. Este tipo de fenômeno pode ser equacionado e é demonstrado para retificadores reais monofásicos e trifásicos. Há estudos que propõe algumas configurações as quais apresentam satisfatória minimização da geração de componentes harmônicas devido à reatância de comutação.

Visando apresentar uma aplicação do protótipo, realizou-se um sistema de paralelismo de fontes de energia, com a intenção de aproximar-se a equipamentos que seriam aplicados em campo, como exemplo os locais de difícil acesso, áreas rurais ou sem eletrificação, os quais, possuindo um meio de armazenamento de energia como um banco de baterias que foi substituído por uma fonte C.C. neste experimento, poderiam obter maior confiabilidade do sistema conectando uma ou

mais fontes de energia em paralelo com o gerador estudado. O protótipo mostrou-se satisfatório para uma simulação em laboratório do paralelismo do gerador.

Para futuros trabalhos, indica-se as seguintes propostas:

- Desenvolvimento de protótipo e novos estudos utilizando ímãs permanentes compostos de materiais com maior valor de densidade de fluxo magnético, o que propiciaria maior eficiência e robustez ao sistema. Desta forma, novos pontos de operação seriam dimensionados e a faixa de operação do gerador seria maior e menos susceptível ao fenômeno da reação de armadura.

- Estudo e desenvolvimento de equacionamento referente à reatância de comutação, para um gerador quadrifásico, permitindo assim relevar este tipo de fenômeno. Também é válido um desenvolvimento de métodos para minimização do ocorrido, conforme citado anteriormente.

- Por fim, um estudo referente a condições extremas que este tipo de máquina pode apresentar, como sobrecargas ou até curto-circuito nos condutores de saída de potência, expandindo este estudo para máquinas compostas por ímãs de maior magnetização. Desta forma, seria facilitado o dimensionamento de proteção para o sistema.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LANDGRAF, Fernando J.G., TEIXEIRA, Júlio C., RODRIGUES, Daniel. **Curso de ímãs – Aplicações, Processos e Propriedades**. São Paulo: IPT, 2004. 162 p.

- [2] SÖDERLUND, L., ERIKSSON, J.T., SALONEN, J., VIHRIÄLÄ, H., PERÄLÄ, R. **A permanent-magnet generator for wind power applications**, v. 32. 1996. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=511354> Acesso em: 2 out. 2004.

- [3] SPOONER, E., WILLIAMSON, A.C., - **Direct coupled, permanent magnet generators for wind turbines applications**, v. 143. 1996. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=488208>. Acesso em: 10 set. 2005.

- [4] HWANG, C.C.; TANG, P.H. **Performance and applications of a small permanent magnet generator**. Taiwan, mai. 2005. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1463763>. Acesso em: 28 mai 2005.

- [5] IRELAND, James R. **Ceramic permanent-magnet motors**. USA: McGraw-Hill, Inc., 1968. 188 p.

- [6] NASAR, S.A., BOLDEA, I., UNNEWEHR, L.E. **Permanent magnet, reluctance and self-synchronous motors**. USA: CRS Press, 1993. 267 p.

- [7] KENJO, T, NAGAMORI, S. **Permanent-Magnet and brushless DC motors**. Oxford: Clarendon Press, 1985. 185 p.

- [8] ALGER, Philip L. **The nature of polyphase induction machines**. New York: Gordon and Breach, Science Publishers, 1970. 2. ed. 518 p.

- [9] LIWSCHITZ, M. **Calcolo e determinazione delle dimensioni delle macchine elettriche**. Milano: Ulrico Hoepli Milano, 1964, v. 3. 453 p.

- [10] SAY, M.G. **Alternating current machines**. London: Pitman Publishing Limited, 1983. 5. ed. 631 p.

[11] MOHAM, N., UNDERLAND, T.N., ROBBINS, W.P. **Power electronics**. USA: 1995. 2. ed. 802 p.

[12] FIORINA, J.N. Harmonics upstream of rectifiers in UPS. **Cahier Technique Merlin Gerin**, Paris, E/CT 160 december 1993. 1 CD ROM.