

ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMANES PERMANENTES, COM ANISOTROPIA INVERSA, ISOLADO ALIMENTANDO UMA CARGA RESISTIVA

Ângela Paula Ferreira
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão - Instituto Politécnico de Bragança
Campus de Santa Apolónia
5301-857 Bragança
Tel: (+351) 273 303 105; Fax: (+351) 273 313 051
e-mail: apf@ipb.pt

A utilização da máquina de ímanes permanentes como gerador isolado tem vindo a ser estimulada pelo aumento das potências disponíveis, através do desenvolvimento dos materiais magnéticos permanentes, nomeadamente nos últimos vinte anos, caracterizado pelo aparecimento das ligas de terras raras, e por uma selecção adequada dos parâmetros da máquina. A análise do funcionamento do gerador de ímanes permanentes isolado, alimentando uma carga resistiva, baseada no modelo de Blondel simplificado, permite demonstrar uma vantagem funcional do circuito magnético anisotrópico inverso, sendo possível obter tensões superiores à força electromotriz induzida em vazio; estudos preditivos e experimentais permitem avaliar a dependência da regulação dos efeitos da saturação e da resistência do estator.

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS

E_0	força electromotriz induzida em vazio, por fase (V)
f	frequência (Hz)
I	corrente (A)
I_d	componente longitudinal da corrente (A)
I_q	componente transversal da corrente (A)
r	razão de anisotropia inversa X_q/X_d
P	potência activa total (W)
R	resistência do estator, por fase (Ω)
R_L	resistência da carga, por fase (Ω)
U	tensão, por fase (V)
U_d	componente longitudinal da tensão, por fase (V)
U_q	componente transversal da tensão, por fase (V)
X_d	reactância síncrona longitudinal (Ω)
X_q	reactância síncrona transversal (Ω)
Z_b	impedância de base (Ω)

- δ ângulo de carga ($^{\circ}$)
 φ ângulo de fase ($^{\circ}$)
 ω velocidade angular (elétrica) (rad/s)

1. INTRODUÇÃO

A existência de anéis e escovas em certas máquinas rotativas torna-as naturalmente menos fiáveis e com custos de manutenção superiores, quando comparadas com máquinas equivalentes mas sem esses elementos. Nesta última hipótese incluem-se as máquinas de ímanes permanentes, com estes localizados na estrutura rotórica, cuja função é criar o campo indutor.

Do ponto de vista funcional, as máquinas de ímanes permanentes são comparáveis às máquinas síncronas convencionais, mas devido à incapacidade de controlo do campo indutor, não é possível exercer uma alteração expedita nas características de funcionamento como a tensão nos terminais da máquina e o factor de potência, embora se tenham realizado algumas tentativas que envolvem a variação da espessura do entreferro ou através do estabelecimento magnético do paralelo de ímanes (Binns, 1979). Do ponto de vista estrutural, são caracterizadas por uma simplicidade similar às máquinas de indução, apresentando um factor de potência superior, o que reduz os requisitos em termos de potência aparente, vantagem significativa para os sistemas em que as máquinas são ligadas a conversores de frequência estáticos.

Porque se eliminam as perdas Joule no rotor, estas máquinas apresentam geralmente rendimentos superiores aos das síncronas convencionais ou de indução. A excitação por ímanes permanentes permite ainda uma redução do passo polar, o que representa uma vantagem significativa em accionamentos a baixas velocidades, pela redução do diâmetro necessário (Grauers, 1996).

Das várias topologias possíveis (interior, periférica ou garra polar (“claw-type”)), as máquinas com os ímanes embutidos no interior do rotor laminado, quer a direcção de magnetização dos ímanes resulte numa configuração circunferencial (de fluxo concentrado) ou radial, apresentam uma relutância baixa segundo o eixo transversal e uma relutância superior segundo o eixo longitudinal, devido à baixa permeabilidade dos ímanes (próxima da do ar). O circuito magnético é anisotrópico, e, em contraposição às máquinas síncronas de pólos salientes convencionais, esta anisotropia caracteriza-se pelo facto da reactância síncrona longitudinal ser inferior à reactância síncrona transversal, dita anisotropia inversa. Este tipo de anisotropia, associada a uma adequada selecção dos parâmetros da máquina, oferece vantagens nas características de funcionamento das máquinas de ímanes permanentes; quando esta funciona a tensão constante, o factor de potência pode ser próximo de um, numa gama considerável das zonas de funcionamento estável. Pretende-se aqui analisar o efeito da anisotropia inversa, inerente às máquinas de ímanes permanentes com os ímanes embutidos, para o funcionamento como gerador isolado. Neste caso a análise centra-se na regulação de tensão. Resultados analíticos e experimentais aqui apresentados demonstram que é possível obter uma regulação de tensão nula ou negativa, quando o gerador de ímanes permanentes alimenta uma carga puramente resistiva, compensando assim parcialmente a desvantagem da ausência do sistema indutor clássico.

2. FUNCIONAMENTO DO GERADOR DE ÍMANES PERMANENTES ISOLADO, ALIMENTANDO UMA CARGA RESISTIVA

Para avaliar a influência da anisotropia inversa no funcionamento do gerador de ímanes permanentes isolado, accionado a velocidade constante, utiliza-se o modelo de Blondel simplificado, derivado da teoria clássica das Duas Reacções, com parâmetros ajustados, que consideram a dependência das reactâncias síncronas do nível de saturação do circuito magnético. O diagrama fasorial associado ao funcionamento da máquina de ímanes permanentes com anisotropia inversa, alimentando uma carga resistiva, é apresentado na Figura 1, sendo $\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX_d\underline{I}_d + jX_q\underline{I}_q$.

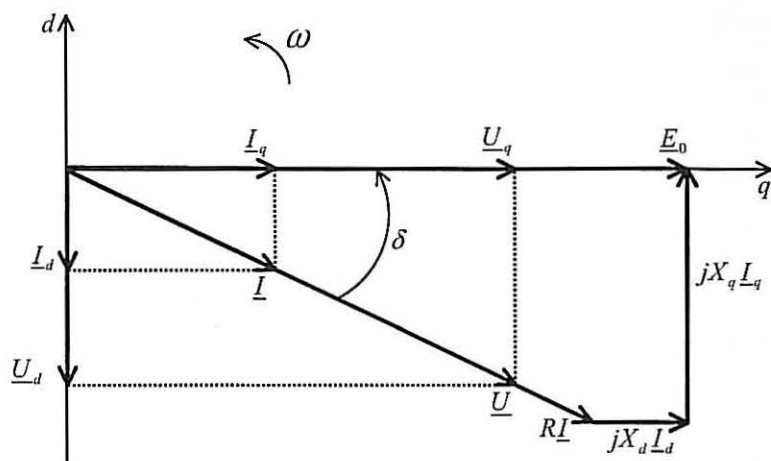


Figura 1: Diagrama fasorial associado ao modelo de Blondel simplificado do gerador de ímanes permanentes, alimentando uma carga resistiva

2.1. Análise teórica, desprezando a resistência do estator e os efeitos da saturação

A partir do diagrama fasorial da Figura 1, desprezando a resistência do estator e considerando os parâmetros da máquina constantes e independentes do regime de carga, as componentes longitudinal e transversal da tensão podem ser expressas por:

$$U_d = -U \sin \delta = -X_q I_q \quad (1)$$

$$U_q = U \cos \delta = E_0 + X_d I_d \quad (2)$$

A partir das equações (1) e (2), como I_d é negativo, U_q é menor que E_0 no valor de $X_d |I_d|$, verifica-se que um valor reduzido de X_d tende a aumentar a componente transversal da tensão, U_q , e um valor elevado de X_q tende a aumentar o valor absoluto da componente longitudinal da tensão, U_d . Como

$$U = \left[(E_0 + X_d I_d)^2 + (X_q I_q)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

verifica-se que para valores pequenos de X_d , ou seja,

$$\lim_{X_d \rightarrow 0} U = \left[E_0^2 + (X_q I_q)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

U pode exceder E_0 , sob condições a identificar (Chalmers, 1994).

Substituindo I por U/R_L , nas componentes longitudinal e transversal da corrente, $I_d = -I \sin \delta$ e $I_q = I \cos \delta$, é possível reformular as equações (1) e (2) da seguinte forma:

$$U \sin \delta = \frac{X_q}{R_L} U \cos \delta \quad (5)$$

$$E_0 = U \cos \delta + \frac{X_d}{R_L} U \sin \delta \quad (6)$$

Da equação (5), obtém-se

$$\tan \delta = \frac{X_q}{R_L} \quad (7)$$

$$\cos \delta = \frac{R_L}{(R_L^2 + X_q^2)^{1/2}} \quad (8)$$

$$\sin \delta = \frac{X_q}{(R_L^2 + X_q^2)^{1/2}} \quad (9)$$

Substituindo as equações (8) e (9) na equação (6), obtém-se

$$U = \frac{E_0 R_L (R_L^2 + X_q^2)^{1/2}}{R_L^2 + X_d X_q} \quad (10)$$

A variação da tensão com a carga é dada por

$$\frac{dU}{dR_L} = \frac{E_0 [R_L^2 (2X_d X_q - X_q^2) + X_d X_q^3]}{(R_L^2 + X_q^2)^{1/2} (R_L^2 + X_d X_q)^2} \quad (11)$$

Para correntes da carga baixas, isto é, R_L grande, tal que $R_L \gg X_d$ e $R_L \gg X_q$, obtém-se

$$\left. \frac{dU}{dR_L} \right|_{R_L \gg X_d, X_q} = \frac{E_0 X_q (2X_d - X_q)}{R_L^3} \quad (12)$$

Da equação (12), demonstra-se que quando a corrente aumenta, ou seja $\Delta R_L < 0$, $\Delta U > 0$ se $X_q > 2X_d$. Assim, a partir desta análise, prevê-se que a tensão atinja valores superiores à força electromotriz induzida em vazio, E_0 , desde que $r = X_q / X_d > 2$.

A tensão nos terminais do gerador é máxima quando $dU / dR_L = 0$, ou seja, quando

$$R_L = X_q \left(\frac{X_d}{X_q - 2} \right)^{1/2} = \frac{X_q}{(r-2)^{1/2}} \quad (13)$$

ou

$$\tan \delta = \frac{X_q}{R_L} = (r-2)^{1/2} \quad (14)$$

sendo o valor máximo da tensão dado por

$$U_{max} = \frac{E_0 r}{2(r-1)^{1/2}} \quad (15)$$

que ocorre para uma corrente

$$I_m = \frac{U_{max}}{R_L} = \frac{E_0 r (r-2)^{1/2}}{2X_q (r-1)^{1/2}} \quad (16)$$

De salientar que, com as simplificações adoptadas (resistência do estator e efeitos de saturação desprezáveis), o valor de I_m é independente da frequência.

Com base nesta análise, apresentam-se na Tabela 1 as evoluções de U_{max}/E_0 e do ângulo de carga correspondente, com a variação da razão de anisotropia, verificando-se que, se a razão de anisotropia for suficientemente elevada, a tensão nos terminais do gerador pode exceder apreciavelmente a força electromotriz em vazio.

Tabela 1: Variação com r das condições para U_{max}

r	U_{max}/E_0	$\tan \delta$	$\delta(^{\circ})$
2,5	1,021	0,707	35,26
3,4	1,061	1,0	45
4	1,155	1,414	54,73
5	1,250	1,732	60
6	1,340	2,0	63,4
7	1,420	2,36	65,9
8	1,510	2,46	67,8

2.2. Análise preditiva e experimental

No sentido de corroborar a análise teórica desenvolvida no ponto anterior, foi realizado um estudo preditivo das características externas associadas ao funcionamento de uma máquina de ímanes permanentes com anisotropia inversa, alimentando uma carga resistiva variável, numa gama de frequências compreendidas entre 20Hz e 90Hz. A análise preditiva é realizada inicialmente desprezando os efeitos da resistência do estator e da saturação, introduzindo-se posteriormente os efeitos destas.

Este estudo foi realizado utilizando a máquina síncrona trifásica de ímanes permanentes SIEMENS, Simovert V, de 4 pólos, com as seguintes características nominais: $U_n = 190$ V, ligação dos enrolamentos em estrela; $I_n = 17$ A; $P_n = 3$ kW; $f_n = 50$ Hz; $\cos \varphi_n = 0,63$; $f_{min} = 20$ Hz; $f_{max} = 100$ Hz; 3,8V/Hz. Os parâmetros da máquina, associados ao modelo de Blondel simplificado, determinados em estudos anteriores (Ferreira, 2000), são os seguintes:

$$\begin{cases} E_0 = 1,029 f \\ R = 0,0001 f + 0,4882 \\ X_d = f/f_n 6,99 \quad I_d \leq 1,22 \\ X_d = f/f_n (-0,188 I_d + 7,22) \quad I_d > 1,22 \\ X_q = f/f_n (-4,778 I_q + 27,795) \end{cases} \quad (17)$$

A metodologia utilizada na determinação numérica das grandezas U e δ associadas ao funcionamento da máquina accionada a uma velocidade constante, sob determinadas condições de carga, obedece a um processo iterativo, por estimação do ângulo de carga (Silva, 1992):

- (i) Para um determinado regime de carga, I , e ângulo de fase, φ , escolher um valor lógico para o ângulo de carga, δ' , tendo em consideração o limite de estabilidade estática;
- (ii) Determinar as componentes longitudinal e transversal da corrente no estator, através das equações $I_d = -I \sin \delta$ e $I_q = I \cos \delta$, respectivamente;
- (iii) Determinar a reactância síncrona longitudinal, através de (17);

- (iv) Calcular $U' = \frac{E_0 + X_d I_d - R I_q}{\cos \delta}$, em que a força electromotriz em vazio é determinada por (17);
- (v) Calcular o valor correspondente da reactância síncrona transversal, X_q , a partir de $X'_q = \frac{U \sin \delta - R I_d}{I_q}$;
- (vi) Se $X'_q \neq X_q(I_q)$, em que $X_q(I_q)$ é imposto por (17), arbitrar novo valor para o ângulo de carga;
Se $X'_q = X_q(I_q)$, então $U = U'$ e $\delta = \delta'$.

2.2.1. Análise preditiva desprezando a resistência do estator e os efeitos da saturação

Sob as hipóteses simplificativas da resistência do estator desprezável e reactâncias síncronas constantes e iguais aos valores não saturados, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 2. As características externas, para as frequências consideradas, são apresentadas na Figura 2.

Tabela 2: Análise preditiva do funcionamento do gerador de ímãs permanentes (U e δ) alimentando uma carga resistiva ($R = 0$ e X_d, X_q constantes)

		f (Hz)							
I (A)	δ (°)	20	30	40	50	60	70	80	90
0,5	14,879	20,923	31,384	41,845	52,306	62,768	73,229	83,690	94,152
1	27,136	21,693	32,539	43,385	54,231	65,078	75,924	86,770	97,616
1,5	36,538	22,506	33,760	45,013	56,266	67,519	78,773	90,026	101,279
2	43,833	23,161	34,741	46,321	57,902	69,482	81,062	92,643	104,223
2,5	49,696	23,575	35,362	47,150	58,937	70,725	82,512	94,300	106,087
3	54,585	23,717	35,575	47,434	59,292	71,151	83,009	94,868	106,726
3,5	58,798	23,568	35,352	47,136	58,920	70,704	82,489	94,273	106,057
4	62,542	23,110	34,664	46,219	57,774	69,329	80,884	92,438	103,993
4,5	65,963	22,314	33,471	44,628	55,785	66,942	78,099	89,256	100,413
5	69,181	21,138	31,707	42,276	52,845	63,414	73,983	84,551	95,120
5,5	72,305	19,509	29,263	39,017	48,772	58,526	68,280	78,035	87,789
6	75,464	17,296	25,944	34,592	43,240	51,888	60,536	69,184	77,832
6,5	78,862	14,228	21,341	28,455	35,569	42,683	49,796	56,910	64,024
7	83,037	9,505	14,258	19,010	23,763	28,516	33,268	38,021	42,774

U (V)

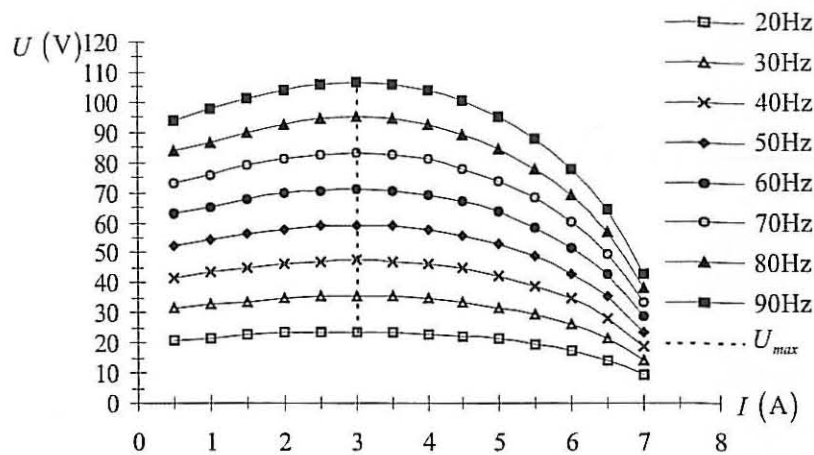


Figura 2: Características externas com factor de potência unitário, para a gama de frequências considerada ($R=0$ e X_d, X_q constantes)

Da análise dos resultados obtidos, é possível verificar que a tensão, para uma determinada corrente é directamente proporcional à frequência (ou velocidade), e o aumento da tensão nos terminais do gerador quando a corrente aumenta a partir de zero é evidente, verificando-se neste exemplo, em que a razão de anisotropia vale 3,976, que o valor máximo ocorre para $I_m = 3$ A, independente da frequência. Os valores obtidos para δ , U_{max} e I_m , são, obviamente, coincidentes com os obtidos através das equações (14), (15) e (16), respectivamente.

A Figura 3 pretende esclarecer o processo de variação do módulo e da fase da tensão quando a corrente aumenta, verificando-se que a tensão pode exceder a força electromotriz, sendo a maior componente produzida pelo fluxo transversal.

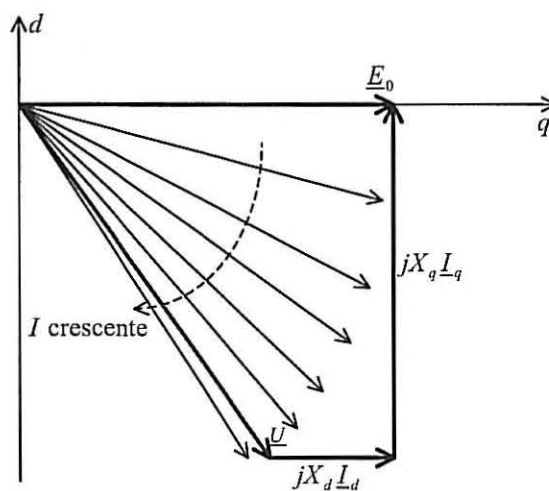


Figura 3: Evolução do fasor tensão com o aumento da corrente ($R = 0$, $X_d = 5,99\Omega$, $X_q = 27,795\Omega$, $f = 50$ Hz)

2.2.2. Análise preditiva considerando o efeito da resistência e desprezando os efeitos da saturação

Para estas condições, obtiveram-se os resultados sumariados na Tabela 3 e na Figura 4.

Tabela 3: Análise preditiva do funcionamento do gerador de ímãs permanentes (U e δ) alimentando uma carga resistiva ($R \neq 0$ e X_d, X_q constantes)

I (A)	δ (°)	f (Hz)							
		20	30	40	50	60	70	80	90
0,5	14,879	20,677	31,138	41,599	52,059	62,520	72,981	83,442	93,902
1	27,136	21,202	32,047	42,892	53,737	64,582	75,428	86,273	97,118
1,5	36,538	21,771	33,022	44,274	55,525	66,777	78,028	89,280	100,531
2	43,833	22,180	33,758	45,336	56,914	68,492	80,070	91,648	103,226
2,5	49,696	22,349	34,133	45,918	57,702	69,487	81,272	93,056	104,841
2,75	52,241	22,332	34,170	46,007	57,845	69,682	81,519	93,357	105,194
3	54,585	22,245	34,100	45,955	57,810	69,665	81,520	93,375	105,230
3,5	58,798	21,851	33,631	45,411	57,191	68,971	80,751	92,531	104,311
4	62,542	21,147	32,698	44,248	55,798	67,348	78,898	90,448	101,998
4,5	65,963	20,106	31,258	42,410	53,562	64,714	75,865	87,017	98,169
5	69,181	18,685	29,248	39,811	50,374	60,938	71,501	82,064	92,627
5,5	72,305	16,811	26,559	36,307	46,055	55,802	65,550	75,298	85,046
6	75,464	14,353	22,994	31,635	40,276	48,917	57,558	66,199	74,840
6,5	78,862	11,039	18,145	25,251	32,358	39,464	46,570	53,676	60,783
7	83,037	6,071	10,816	15,560	20,305	25,049	29,794	34,538	39,283

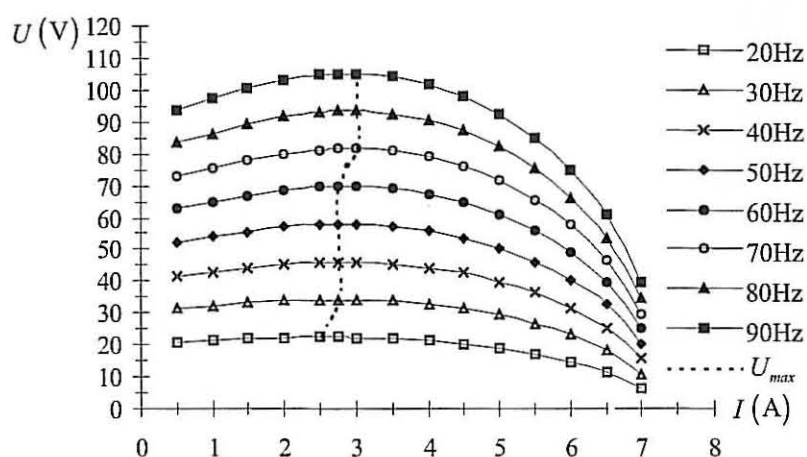


Figura 4: Características externas com factor de potencia unitario, para a gama de frequencias considerada ($R \neq 0$ e X_d, X_q constantes)

A consideração da resistência do estator tem uma influência significativa na regulação da tensão, reduzindo o valor máximo da tensão e o valor da corrente para a qual a tensão é máxima, verificando-se que estes efeitos são mais pronunciados para frequências baixas.

Neste protótipo, a resistência do estator tem efeitos considerados significativos para frequências inferiores a 70Hz; para esta frequência a impedância de base vale

$Z_b|_f = \frac{f}{f_n} Z_b|_{f_n} = 9,03\Omega$. Assim, para que a resistência estática não reduza

significativamente os benefícios da anisotropia inversa na regulação de tensão, é admissível deliberar que ela não deve exceder 0,05pu.

2.2.3. Análise preditiva considerando os efeitos da resistência do estator e da saturação

A saturação do circuito magnético é considerada no modelo, através da variação das reactâncias síncronas transversal e longitudinal, em função das componentes da corrente; dado que a componente da corrente longitudinal é desmagnetizante para o funcionamento do gerador alimentando uma carga resistiva, a variação da reactância correspondente é desprezável. Os resultados obtidos sob estas condições estão sintetizados nas Tabela 4 e Figura 5.

Tabela 4: Análise preditiva do funcionamento do gerador de ímãs permanentes (U e δ) alimentando uma carga resistiva ($R \neq 0$ e X_d, X_q variáveis)

		f (Hz)							
I (A)	δ (°)	20	30	40	50	60	70	80	90
0,5	13,735	20,599	31,020	41,442	51,863	62,285	72,706	83,128	93,549
1	23,785	20,767	31,395	42,023	52,651	63,278	73,906	84,534	95,162
1,25	27,726	20,799	31,504	42,209	52,914	63,618	74,323	85,028	95,733
1,4	29,829	20,792	31,529	42,267	53,005	63,743	74,480	85,218	95,956
1,5	31,140	20,775	31,528	42,282	53,036	63,789	74,543	85,296	96,050
2	36,826	20,542	31,301	42,060	52,819	63,579	74,338	85,097	95,856
2,5	41,513	20,070	30,716	41,361	52,007	62,652	73,298	83,943	94,589
3	45,639	19,386	29,811	40,236	50,661	61,086	71,512	81,937	92,362
3,5	49,526	18,520	28,634	38,749	48,863	58,977	69,092	79,206	89,320
4	53,445	17,508	27,238	36,968	46,698	56,429	66,159	75,889	85,619
4,5	57,613	16,378	25,666	34,953	44,241	53,529	62,816	72,104	81,391
5	62,126	15,133	23,921	32,708	41,495	50,283	59,070	67,857	76,645
5,5	66,907	13,706	21,902	30,098	38,294	46,490	54,686	62,882	71,078
6	71,801	11,923	19,350	26,776	34,202	41,629	49,055	56,482	63,908
6,5	76,789	9,444	15,753	22,061	28,370	34,679	40,987	47,296	53,605
7	82,292	5,400	9,809	14,217	18,626	23,035	27,443	31,852	36,261

U (V)

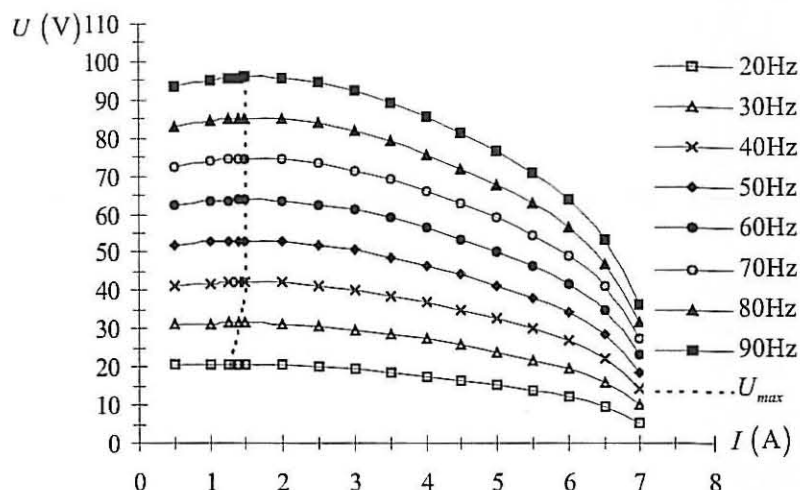


Figura 5: Características externas com factor de potência unitário, para a gama de frequências considerada ($R \neq 0$ e X_d, X_q variáveis)

Da análise destes resultados, verifica-se que a consideração da saturação segundo o eixo transversal, diminui a razão de anisotropia, o que acentua a “deterioração” da regulação de tensão provocada pela resistência do estator, diminuindo o valor da tensão máxima e o valor da corrente para a qual se verifica a tensão máxima. A diminuição da razão de anisotropia é ilustrada na Figura 6.

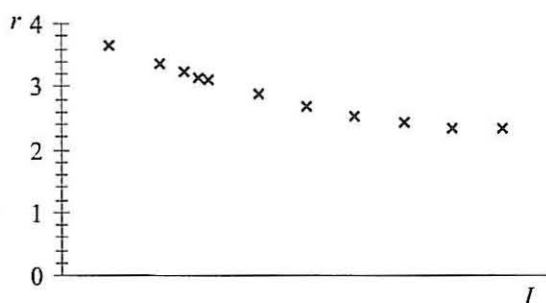


Figura 6: Variação da razão de anisotropia, por consideração dos efeitos da saturação

Os efeitos da resistência do estator e da saturação comparativamente à situação ideal (resistência estatórica e saturação desprezáveis) na regulação da tensão para U_{max} estão sumariados na Tabela 5, em que a regulação é calculada por $Reg = (E_0 - U) / E_0$.

Tabela 5: Influência da resistência do estator e da saturação na regulação da tensão

f (Hz)	$R = 0$		$R \neq 0$		$R \neq 0$	
	Reg (%)	I_m (A)	Reg (%)	I_m (A)	Reg (%)	I_m (A)
20	-15,24	3	-8,59	2,5	-1,07	1,25
30	-15,24	3	-10,69	2,75	-2,14	1,4
40	-15,24	3	-11,78	2,75	-2,73	1,5
50	-15,24	3	-12,43	2,75	-3,08	1,5
60	-15,24	3	-12,86	2,75	-3,32	1,5
70	-15,24	3	-13,18	3	-3,49	1,5
80	-15,24	3	-13,43	3	-3,62	1,5
90	-15,24	3	-13,63	3	-3,71	1,5

2.2.4. Análise experimental e comparação dos resultados com os previstos

Os testes experimentais do protótipo em estudo foram obtidos accionando o gerador de ímanes permanentes, que alimenta uma carga trifásica variável, a três velocidades distintas, através de um motor de ímanes permanentes, alimentado através de um conversor electrónico de frequência, permitindo assim, variar a frequência de funcionamento do protótipo em estudo.

Na Figura 7, comparam-se as características externas determinadas experimentalmente com as características externas previstas, considerando os efeitos da resistência do estator e da saturação, para as frequências de 30Hz, 50Hz e 70Hz.

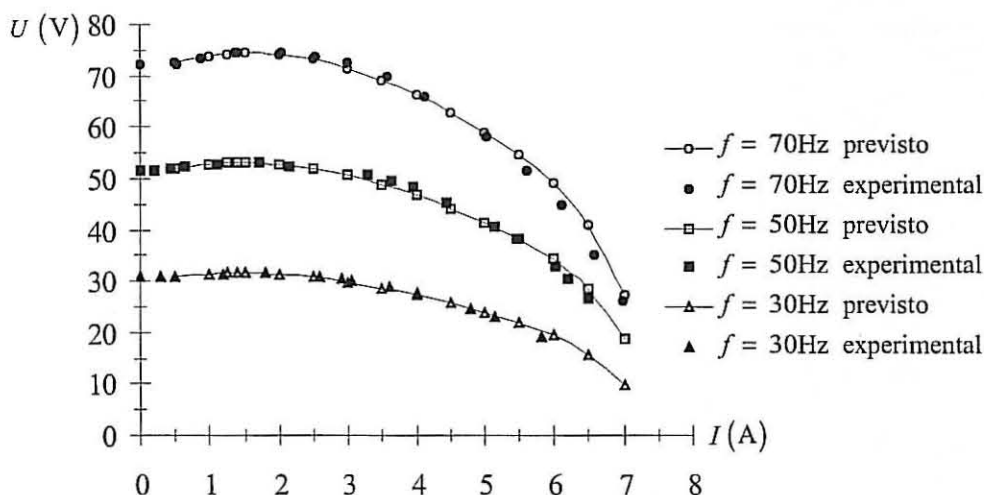


Figura 7: Comparação das características externas determinadas experimentalmente com as previstas

Verifica-se que a correlação entre os resultados previstos e experimentais é razoavelmente boa, embora para correntes superiores a 5A, as tensões medidas sejam ligeiramente inferiores às previstas. Estas discrepâncias podem resultar de uma variação da saturação magnética mais complexa do que a modelizada; a força electromotriz, resultante da presença dos ímanes, depende da saturação do circuito magnético e da temperatura dos próprios ímanes, tendo sido considerada independente destes factores. Relativamente à variação da resistência com a temperatura, efeito também desprezado, é de esperar que esta seja mais significativa para frequências baixas, dado que o arrefecimento do estator é menos eficiente a velocidades baixas.

3. CONCLUSÃO

A experiência com máquinas síncronas convencionais funcionando como geradores isolados sugere que regulações negativas ou nulas só podem ser obtidas através de cargas capacitivas. Ao longo deste trabalho foi possível verificar que uma máquina de ímanes permanentes pode apresentar uma regulação negativa ou nula, quando alimenta uma carga puramente resistiva. A dependência deste fenómeno da razão de anisotropia, demonstrada teoricamente, foi corroborada por testes experimentais, em que se verifica um cancelamento deste efeito para valores da resistência do estator e níveis da saturação elevados.

Perspectiva-se, assim, a orientação do projecto de máquinas de ímanes permanentes de modo a que seja possível obter uma regulação nula em regime nominal e com factores de potência indutivos.

REFERÊNCIAS

Binns, K. J. et al., *Permanent-Magnet A.C. Generators*, Proceedings IEE, Vol. 126, nº 7, Julho 1979

Chalmers, B. J., *Performance of Interior - Type of Permanent - Magnet Alternator*, IEE Proceedings – Electrical Power Applications, Vol. 141, nº 4, Julho 1994

Ferreira, A. P., *Problemática e Perspectivas da Utilização do Gerador de Ímanes Permanentes na Produção de Energia Eólica*, Dissertação de Mestrado, FEUP, Dezembro 2000

Grauers, A., *Design of Direct-Driven Permanent-Magnet Generators for Wind Turbines*, Technical Report nº 292, Chalmers University of Technology, Outubro 1996

Silva, A. M. et al., *An Analysis of Temperature Influence on Permanent Magnet Synchronous Generator Performance*, UPEC, 1992