



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO 2 -GPT

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

AValiação de Desempenho de um Micro-gerador Assíncrono

José Fabio Kolzer(*)
UTFPR

Allan Gregori De Castro
UTFPR

César Augusto Portolan
UTFPR

Jean-Marc Stephane Lafay
UTFPR

RESUMO

Por causa da sua robustez e baixo custo, o gerador assíncrono é uma alternativa interessante em micro-centrais funcionando de maneira isolada da rede elétrica. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de uma máquina de indução trifásica utilizada como gerador assíncrono isolado da rede elétrica em condições controladas de laboratório. Analisou-se o desempenho da máquina por meio do modelo de Doxey, bem como por medição direta, em condições de carga e capacitância de excitação variável. Concluiu-se que a máquina assíncrona apresenta elevada regulação de tensão, entretanto, ela melhora de maneira significativa com a utilização de bancos de capacitores variáveis.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador assíncrono, Capacitância, Autoexcitação, Desempenho

1.0 - INTRODUÇÃO

Micro-centrais hidrelétricas funcionando de maneira isolada da rede elétrica constituem uma solução interessante para consumidores que se encontram localizados em áreas distantes das linhas de distribuição. Os geradores síncronos são utilizados tradicionalmente nestas micro-centrais hidrelétricas pelo fato de serem mais fáceis de controlar. Uma alternativa é o gerador assíncrono, mais barato e robusto que máquina síncrona, embora seja bem conhecida a sua elevada regulação de tensão, principalmente em condições de capacitância de excitação constante.

Com o propósito de manter a tensão nos terminais da máquina assíncrona num valor específico, a capacitância de excitação deve aumentar quando a demanda da carga aumenta [1]. Estudos revelam que há valores críticos de impedância de carga e velocidade abaixo dos quais a autoexcitação é impossível sem levar em conta a capacitância utilizada [2]. Isto fica ainda mais acentuado para cargas de natureza indutiva em virtude da diminuição da capacitância efetiva [3]. O valor da capacitância mínima autoexcitação aumenta quando a potência reativa da carga aumenta [1].

Neste trabalho analisou-se o efeito de incremento da carga fornecida por uma máquina de indução sobre o valor da tensão nos terminais e sua frequência, em condições de velocidade da máquina primária constante, e o valor da capacitância de autoexcitação também constante. O comportamento da máquina foi analisado utilizando cargas de fator de potência unitário bem como cargas de fator de potência em atraso. Na sequência, incrementou-se o valor da capacitância de autoexcitação com o intuito de melhorar a regulação de tensão para cargas com fator de potência em atraso. As características de desempenho foram obtidas, em primeiro lugar, através da análise do circuito equivalente da máquina de indução proposta por Doxey, para cargas resistivas [2]. Estes resultados foram comparados com aqueles obtidos por medição direta nos terminais da máquina de indução.

2.0 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO POR MEIO DO MODELO DE DOXEY

O modelo de Doxey [3], que deriva do modelo clássico em regime permanente da máquina de indução a ser utilizado nesta análise é apresentado na Figura 1, onde todos os parâmetros da máquina foram expressos em **fsfb**

Equação 1. Neste modelo da máquina, o braço de excitação se encontra deslocado para os terminais de saída do gerador e a carga do seu modelo série foi transformada para o seu modelo paralelo, conforme Figura 2. A mesma transformação é utilizada para a impedância de dispersão da máquina, resultando o modelo simplificado da Figura 3. Do balanço de energia ativa e reativa resultam o escorregamento da máquina para a capacitância de excitação utilizada; a velocidade da máquina e a carga específica. A partir destes são determinados a frequência da tensão gerada, a reatância de magnetização, a corrente de magnetização e o valor da tensão nos terminais. As relações entre estes parâmetros são detalhadas em [3]. Nos modelos da Figura 2 e Figura 3, o índice 'p' indica impedância equivalente paralela.

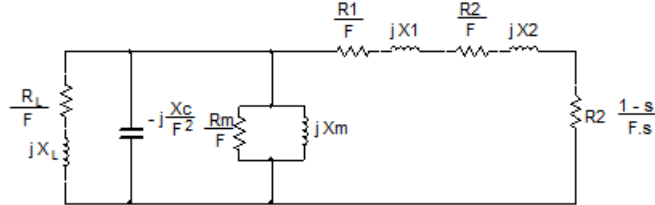


Figura 1 – Modelo Clássico simplificado do gerador de indução autoexcitado.

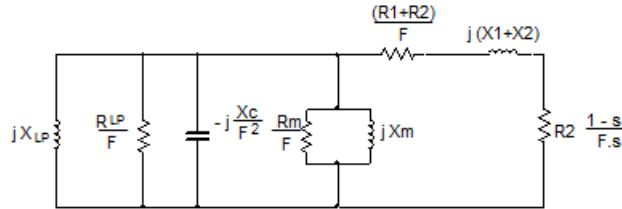


Figura 2 – Circuito equivalente compacto do gerador de indução com cargas em paralelo.

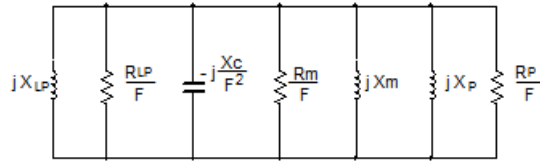


Figura 3 – Modelo de Doxey simplificado para o gerador de indução.

$$F = \frac{f_s}{f_b}$$

Equação 1

2.1 Obtenção dos parâmetros do modelo

A máquina de indução em estudo é um motor de indução trifásico gaiola de esquilo cujos dados de placa são apresentados na Tabela 1. Para obtenção dos parâmetros do modelo de Doxey foram efetuados os ensaios detalhados na sequência.

Tabela 1 – Dados da máquina

Tensão nominal	Frequência nominal	Corrente nominal	Número de polos	Ligação dos enrolamentos	Potência nominal	Fator de Potência	Rendimento	Categoria
220 V	60Hz	4,78 A	4	Triângulo	1,1 KW	0,83	72,7%	N

2.1.1 Ensaio de vazio

Com o intuito de eliminar as perdas no cobre do rotor, acionou-se o rotor da máquina de indução na velocidade síncrona utilizando outro motor controlado com conversor de frequência. Na sequência, aplicou-se tensão aos terminais do estator da máquina ensaiada no intervalo de 0 V até 248V e foram registrados os valores respectivos de corrente do estator, conforme apresentado na Tabela 2. Para o valor de tensão correspondente ao valor nominal da máquina foi também medida a potência ativa, apresentada na Tabela 3. Os valores da Tabela 2 foram utilizados para construir a curva de magnetização da máquina, apresentada na Figura 4. Com os valores da Tabela 3 foram

calculados a resistência que modela as perdas no núcleo, R_c , e a soma das reatâncias de dispersão do estator e de magnetização, $X_1 + X_m$.

Tabela 2 – Valores de tensão e corrente medidos a vazio

Tensão V	Corrente A
0	0,05
10	0,20
20	0,33
30	0,44
40	0,54
50	0,64
60	0,73
70	0,84
80	0,95
90	1,05
100	1,14
110	1,25
120	1,39
130	1,50
140	1,61
150	1,76
160	1,89
170	2,02
180	2,21
190	2,38
200	2,57
210	2,74
220	3,00
230	3,37
240	3,74
248	4,06

Tabela 3 – Dados obtidos no ensaio de vazio

Tensão V	Corrente A	Potência W
220	3,32	230

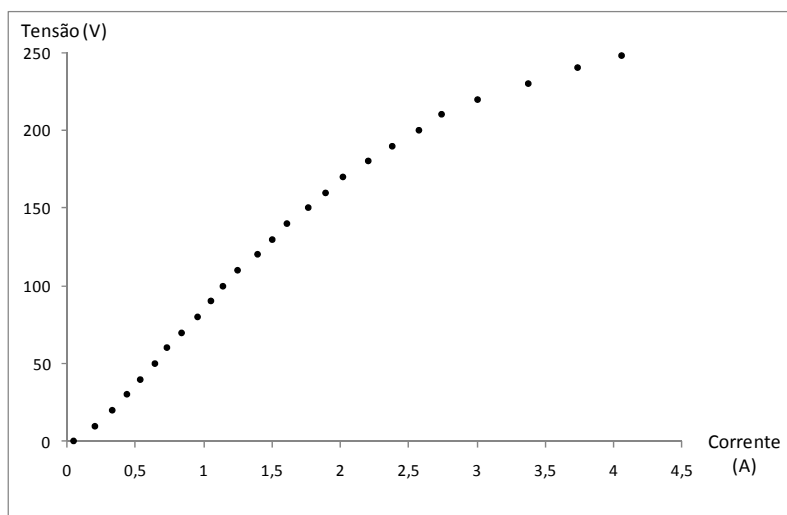


Figura 4- Curva de Magnetização da máquina

2.1.2 Ensaio de rotor bloqueado

Os valores de impedância obtidos do ensaio de rotor bloqueado, junto com aqueles obtidos do ensaio de vazio e da medição da resistência dos enrolamentos do estator, permitiu calcular os valores das reatâncias de dispersão do

estator e do rotor, X_1 e X_2 respectivamente, bem como o valor da resistência referida do rotor, R_2 . Em posse dos valores de X_1 , obteve-se o valor de X_m . A metodologia de ensaio e o procedimento de cálculo para obtenção dos parâmetros encontram-se descritos em [4] e [5].

Tabela 4- Dados obtidos do ensaio de rotor bloqueado

Tensão V	Corrente A	Potência W
47,6	4,78	305

2.1.3 Medição direta da resistência dos enrolamentos do estator

Mediu-se o valor da resistência entre fases do estator, R_{ff} . Após determinar o valor médio das leituras entre fases, e levando em conta o tipo de ligação dos enrolamentos do estator, calculou-se o valor da resistência por fase Y, R_1 .

Tabela 5 – Valores obtidos por medição direta de resistências entre fases

R_{RS}	R_{ST}	R_{TR}	$R_{médio}$
5,63 Ω	5,6 Ω	5,58 Ω	5,6 Ω

Tabela 6 – Parâmetros calculados do circuito equivalente

R_1	R_2	X_1	X_2	R_M	X_M
2,8 Ω	1,85 Ω	1,50 Ω	2,21 Ω	352,87 Ω	36 Ω

2.2 Modelagem das cargas utilizadas

Foram utilizados bancos trifásicos de resistores como cargas resistivas. O valor da resistência por fase foi determinado em função das leituras de potência ativa, tensão e corrente para cada condição de carga do gerador de indução, conforme mostrado na Tabela 7. Detalhes das condições que foram efetuados estes ensaios são descritas em 3.1.

Tabela 7 – Ensaio de carga do gerador de indução com cargas resistivas

Carga	Impedância por fase Y Ω	Tensão V	Corrente A	Potência W
1	943,6	257,0	0,12	70
2	320,6	253,2	0,41	200
3	239,8	249,7	0,55	260
4	158,5	243,8	0,82	375
5	79,2	232,0	1,59	680
6	71,3	225,0	1,71	710
7	62,4	219,2	1,93	770
8	58,9	215,7	2,03	790
9	53,0	210,3	2,23	835
10	39,9	192,0	2,73	925

2.3 Resultados obtidos da análise do modelo

A partir do modelo de Doxy foram determinados, para uma capacitância fixa de 93 μF , na configuração estrela: o escorregamento, a frequência da tensão gerada, a reatância de magnetização, a corrente de magnetização, o valor da tensão gerada e corrente de carga. A seguir são apresentadas as relações utilizadas para determinação dos mencionados parâmetros.

2.3.1 Determinação do escorregamento

O valor do escorregamento correspondente a cada carga foi determinado utilizando a seguinte relação válida para

$$X_1 + X_2 \ll R_{mL}, \text{ com } R_{mL} \text{ dado pela } R_{mL} = \frac{R_m R_{LP}}{R_m + R_{LP}}$$

Equação 2.

$$R_{mL} = \frac{R_m R_{LP}}{R_m + R_{LP}}$$

Equação 2

$$S = - \frac{R_2 \cdot (R_c + R_{LP})}{R_1 \cdot (R_c + R_{LP}) + R_c R_{LP}} \quad \text{Equação 3}$$

2.3.2 Determinação da frequência síncrona e da frequência por unidade

A frequência da tensão gerada foi estimada a partir da velocidade do rotor de 1800 rpm (377 rad/s) e do escorregamento calculado anteriormente conforme Equação 2. Na sequência, determinou-se o valor da frequência por unidade

$$\omega_s = \frac{\omega_r}{1-s} \quad \text{Equação 4}$$

2.3.3 Determinação da reatância de magnetização

A reatância de magnetização foi obtida a partir do balanço de energia reativa do circuito equivalente da Figura 3, do qual resultou a equação de X_m

$$X_m = \frac{1}{F^2 \omega_b C - \frac{1}{X_p} - \frac{1}{X_{LP}}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde X_p é expresso por:

$$X_p = \frac{\left(\frac{R_1}{a} + \frac{R_2}{a.s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}{X_1 + X_2} \quad \text{Equação 6}$$

2.3.4 Determinação da corrente de magnetização

A curva de magnetização foi representada matematicamente por meio da aproximação polinomial expressa na $V = -2,8535.I^2 + 35,818.I + 44,69$ Equação 7, e a partir desta relação foi determinada a lei de variação da reatância de magnetização em função da corrente de excitação, conforme $X_m = -2,8535.I + 35,818 + \frac{44,69}{I}$ Equação 8.

$$V = -2,8535.I^2 + 35,818.I + 44,69 \quad \text{Equação 7}$$

$$X_m = \frac{V}{I}$$

$$X_m = -2,8535.I + 35,818 + \frac{44,69}{I} \quad \text{Equação 8}$$

Desta última resultou a corrente de magnetização correspondente ao valor de X_m , determinado pela $X_m =$

$$\frac{1}{F^2 \omega_b C - \frac{1}{X_p} - \frac{1}{X_{LP}}} \quad \text{Equação 5. Finalmente, a partir da } \omega_s = \frac{\omega_r}{1-s}$$

Equação 4 e da $V = -2,8535.I^2 + 35,818.I + 44,69$ Equação 7 calcula-se o valor da tensão gerada por fase, conforme $V_f = F \cdot I_m \cdot X_m$ Equação 9.

$$V_f = F \cdot I_m \cdot X_m \quad \text{Equação 9}$$

2.3.5 Características de Desempenho obtidas a partir do modelo de Doxey

A partir da análise do modelo de Doxey do gerador de indução trifásico, construíram-se as características de Tensão X Corrente de carga e Frequência X Corrente de carga para carga resistiva, conforme ilustrado na Figura 5 – Característica Tensão X Corrente de Carga obtidas a partir do Modelo de Doxey para carga resistiva e Figura 6. Os valores de tensão em ambas as características são valores de linha.

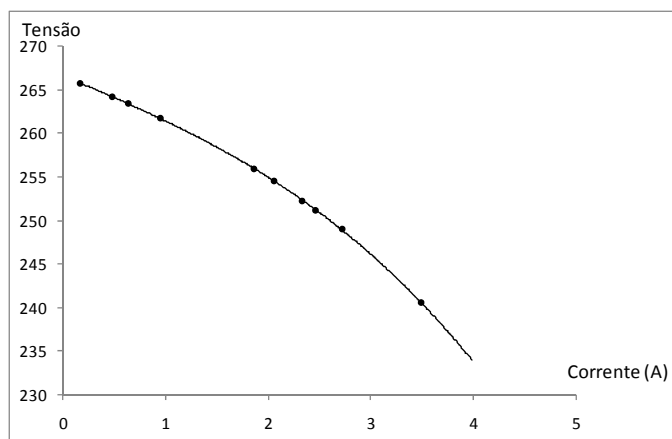


Figura 5 – Característica Tensão X Corrente de Carga obtidas a partir do Modelo de Doxey para carga resistiva

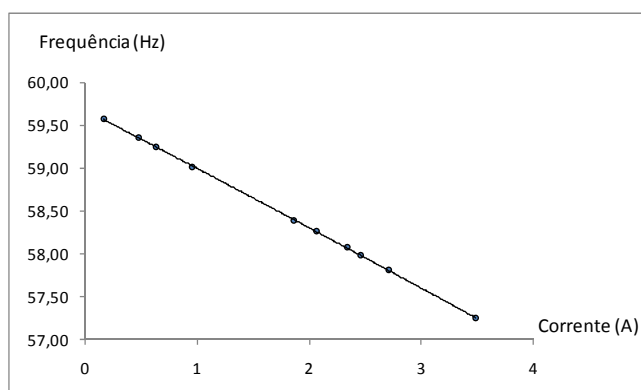


Figura 6 - Característica Frequência X Corrente de Carga obtidas a partir do Modelo de Doxey para carga resistiva

3.0 - AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO POR MEIO DE MEDIÇÃO DIRETA

3.1 – Ensaio com carga resistiva

Utilizando um motor de indução acionado por conversor de frequência, manteve-se a velocidade do gerador de indução em aproximadamente 1800 rpm. Manteve-se o valor da capacitância em 93uF por fase e foram registrados os valores de tensão de linha, corrente de linha na carga, potência trifásica e frequência da tensão de saída para 10 valores de cargas resistivas, conforme foi apresentado na Tabela 7.

A partir destes dados foram obtidas as curvas de tensão de saída em função da corrente na carga e frequência da tensão gerada em função da corrente de carga conforme ilustrado na Figura 7e Figura 8.

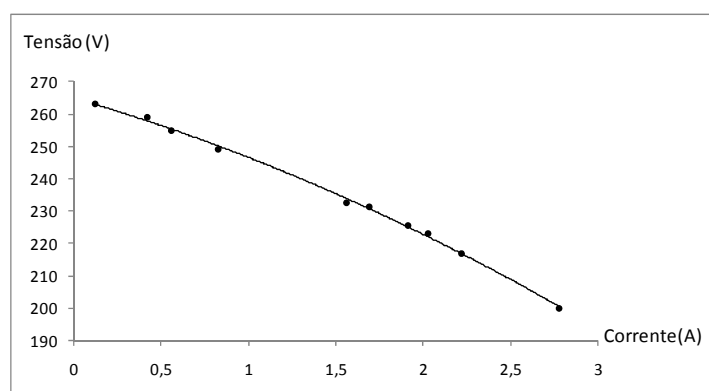


Figura 7 - Característica Tensão X Corrente de Carga obtidas por medição direta para carga resistiva

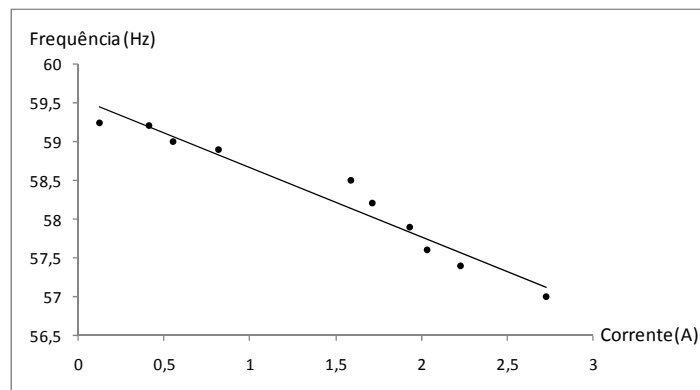


Figura 8 - Característica Frequência X Corrente de Carga obtidas por medição direta para carga resistiva

3.2 Ensaio com carga em atraso

Para avaliar o comportamento do gerador de indução com cargas de fator de potência em atraso utilizaram-se bobinas ligadas em série em estrela de modo a obter as cargas indicadas na

Tabela 8 –.

Tabela 8 – Tensão, corrente de carga e frequência, com capacitância de 93 μ F e cargas de fator de potência em atraso

Carga	Tensão medida V	Corrente medida A	Frequência medida Hz	Resistência medida Ω	Impedância Ω	Reatância Ω	Indutância H
1	237,8	0,710	59,35	62	193,38	183,17	0,49
2	235,6	0,790	59,30	46	172,19	165,93	0,45
3	225,6	0,917	59,00	23	142,04	140,17	0,38
4	180,0	1,370	58,95	160	75,87	53,70	0,15

Como pode ser observado na

Tabela 8, para a carga 4 o valor da tensão gerada caiu para valores significativamente abaixo do valor nominal (220V). Assim percebe-se que a regulação de tensão para esta condição de carga não é satisfatória quando a capacitância de autoexcitação é mantida constante.

3.3 Ensaio com capacitância de autoexcitação variável

Como pode ser constatado no ensaio com cargas em atraso, a regulação de tensão aumenta significativamente quando são alimentadas cargas com fator de potência em atraso por causa da demanda adicional de energia reativa que deve fornecer a capacitância de autoexcitação. Neste ensaio foi incrementado a capacitância de autoexcitação por meio da adição de um banco trifásico de capacitores ligados em estrela de 20 μ F por fase. Na Tabela 9 são ilustrados os resultados obtidos antes e após a adição deste banco.

Tabela 9 – Comparação da tensão e corrente para carga 4 funcionando com capacitância de 93 μ F e de 113 μ F

Capacitância de autoexcitação	Tensão medida V	Corrente medida A	Frequência medida Hz	Resistência medida Ω	Impedância Ω	Reatância Ω	Indutância H
93 μ F	180	1,37	58,95	53,3	75,87	53,70	0,15
113 μ F	228,5	1,73	58,85	53,3	76,25	54,50	0,15

4.0 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como é evidenciado a partir da Figura 9 e Figura 10, o modelo de Doxey prevê menores valores de regulação de tensão e maiores valores de frequência do que de fato foram registrados a partir de medição direta. Esta divergência pode ser atribuída a vários fatores: 1) o modelo de Doxey não leva em conta a queda de tensão na impedância do estator, o que conduz a sobrestimar o valor da tensão na carga; 2) Não foi possível manter a velocidade do rotor exatamente 1800 rpm para diversas condições de carga. Este fato introduziu erros, sobretudo na frequência medida. 3) Os valores das resistências de carga foram calculados a partir de medições de potência utilizando um wattímetro analógico, o que induziu a erros, principalmente para valores lidos em início de

escala. 4) Em virtude da característica de vazio ter sido construída com valores tensão de até 248 V e 4,06 A, não é possível garantir que a aproximação polinomial utilizada permita de fato prever com precisão valores de tensão e frequência acima destes limites.

No que diz respeito ao comportamento da regulação de tensão com carga de fator de potência unitário e cargas de fator de potência em atraso, percebe-se que a regulação de tensão é ainda maior para cargas indutivas, o que pode ser explicado pela diminuição da capacitância efetiva. Assim, com o intuito de manter a tensão no valor próximo ao nominal, torna-se necessário o incremento da capacitância de autoexcitação em função da energia reativa demandada pela carga.

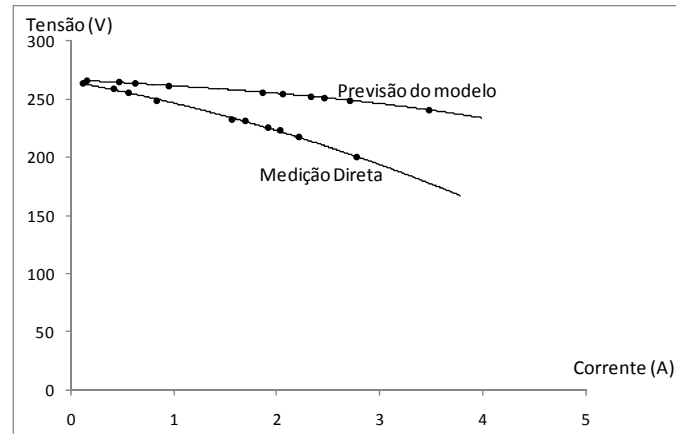


Figura 9 – Característica Tensão X Corrente de carga prevista pelo modelo de Doxey e característica Tensão X Corrente obtida por medição direta.

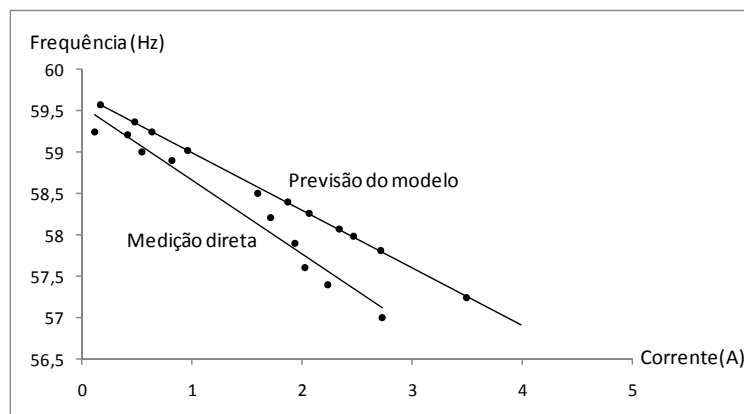


Figura 10 – Característica Frequência X Corrente de carga prevista pelo modelo de Doxey e característica Frequência X Corrente obtida por medição direta.

5.0 - CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos deste trabalho pode –se concluir: 1) Não é possível manter uma regulação de tensão dentro dos limites práticos aceitáveis quando a capacitância de autoexcitação é mantida constante, principalmente quando são alimentadas com fator de potência em atraso. Isto pode ser remediado incrementando a capacitância de autoexcitação de maneira a suprir a demanda de potência reativa adicional da carga. 2) Os resultados obtidos pela utilização do modelo de Doxey mostraram-se otimistas em relação àqueles observados nos ensaios de medição direta. Isto revela a necessidade de utilizar modelos que permitam obter previsões mais precisas do desempenho da máquina de indução.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - HARRINGTON, R. J. e BASSIOUNY, F. M. M. New insights for capacitance requirements for isolated induction generators.
- (2) – CHAN, T. F. Capacitance requirements of self-excited induction generators. IEEE transactions on energy conversion. 1993.
- (3) – SIMÕES, M. G.; FARRET, F. A. Alternative Energy Systems – Design and Analysis with Induction Generators. Second Edition. CRC Press, 2008.

(4) – FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. xiii, 648 p.

(5) – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaio. NBR 5383-1. Brasil.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Autor 1

Nome: José Fabio Kolzer

Local e data de nascimento: General José de San Martín, Chaco, Argentina, 19/04/1973

Graduação: Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina, 1998

Pós-graduação: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2001.

Experiência profissional: Professor do curso de Engenharia Elétrica.

Título: Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia Elétrica,

Área de atuação: Máquinas elétricas.

Publicações:

GONÇALVES LINS, D. A., KOLZER, J.F. Caracterização elétrica de um motor de indução trifásico. Synergismus científica UTFPR. 2008.

Fotografia do Autor 1



Autor 2

Nome: Allan Gregori de Castro

Local e data de nascimento: Curitiba, Paraná, Brasil, 19/11/1989

Graduação: Acadêmico de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, Paraná, Brasil.

Publicações:

CASTRO, A. G.; SILVA, N. D. P.; STEIN, C. M. O. Estudo e implementação de comando digital para um inversor com comutação suave. SICITE 2009.

CASTRO, A. G.; TOALDO, M. P.; STEIN, C. M. O. Estudo e implementação de comando de circuitos eletrônicos de alta eficiência para iluminação LED. SICITE 2010.

Autor 3

Nome: César Augusto Portolann

Local e data de nascimento: Jóia, Rio Grande do Sul, Brasil, 26/11/1963.

Graduação: Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 1993.

Pós-graduação: Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 1995.

Experiência profissional: Professor no curso de Engenharia Elétrica.

Título: Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de atuação: Sistemas de Potência.

Publicações:

PORTOLANN, C. A.; STEPHANE LAFAY, J.; KOLZER, J. F.; DA SILVA, J.; SLONGO, B. L. Aumento do fator de carga de distribuidoras restringindo o uso de chuveiros elétricos. CIDEL Argentina 2010.

Autor 4

Nome: Jean-Marc Stephane Lafay

Local e ano de nascimento: MARSEILLE, FRANÇA, 1969

Local e ano de graduação / pós-graduação: 1994/2005

Experiência profissional: Professor do programa de mestrado em engenharia elétrica da UTFPR.

Título: Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de atuação: Energias renováveis e eficiência energética.

