

## Alternativas para controle de tensão e frequência em sistemas de geração isolada

A.V.Braga\*, A.J.J.Rezek\*, E.C.Bortoni\*, L.F.B.Costa\*, J.M.E.Vicente\*, C. A. Luczkiewicz\*\*, G. R. Marques \*, L. H.Simões\*, J.C.G. Rodrigues\*, D.F.Bernardes\*, R. Di.L. Corrêa\*

\*Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) Av. BPS, 1303, Cx. Postal :50, CEP 37500-903 Itajubá (MG)

\*\*Professor da Faculdade de Tecnologia FATEC SENAI MT, Brasil e doutorando na UNIFEI

e-mails: [avbdsc@gmail.com](mailto:avbdsc@gmail.com); [rezek@unifei.edu.br](mailto:rezek@unifei.edu.br)

### RESUMO

Pretende-se apresentar a alternativa de geração isolada através de geradores de indução trifásicos visando à aplicação no meio rural. Na operação isolada, é necessário que haja um banco de capacitores, para fornecimento de potência reativa para o gerador, quer seja este monofásico ou trifásico. Na operação interligada com a rede, o banco de capacitores não é mais necessário, uma vez que a potência reativa para o funcionamento da máquina assíncrona, a qual sempre consome potência reativa é suprida pela rede. Serão apresentadas no trabalho as possibilidades de controle de tensão e frequência, utilizando controle contínuo, aplicado em uma carga auxiliar lastro resistiva, por intermédio da utilização de controlador CA trifásico tiristorizado, o qual emprega o arranjo de tiristores em antiparalelo por fase. Também controle chaveado será apresentado no trabalho, com a utilização de lógica binária de chaveamento das cargas auxiliares, com a vantagem de que neste caso, ao contrário da primeira alternativa empregando controle contínuo, não há geração de harmônicos por parte da carga auxiliar. Logo, na primeira alternativa, o controle de potência da carga auxiliar é realizado por intermédio de alteração do valor eficaz de tensão aplicado nesta carga, portanto caracterizando carga controlada, ao passo que no sistema alternativo de carga chaveada, a tensão não é variada, tensão da máquina aplicada nas cargas de potências diferenciadas em número, por exemplo, de quatro, que são assim inseridas para este controle chaveado, de acordo com lógica binária a ser apresentada. Ressalta-se o fato de que a carga auxiliar é inserida em paralelo com a carga principal do gerador, sendo que quando se diminui a carga principal, há o aumento da carga auxiliar e vice-versa, ou seja, o gerador enxerga sempre uma carga ativa aproximadamente constante, havendo desta forma manutenção da tensão da máquina e frequência alterando em uma faixa aceitável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Máquina de indução trifásica (MIT), operação isolada do gerador trifásico assíncrono, lógica binária, controle por histerese, carga lastro.

## Alternatives for voltage and frequency control in isolated generation systems

### ABSTRACT

It is intended to present the alternative of isolated generation of three-phase induction generators aiming at the application in the rural environment. In isolated operation, it is necessary that there be a bank of capacitors, to supply reactive power to the generator, whether this one-phase or three-phase. In the operation connected to the network, this bank of capacitors is no longer necessary, since the reactive power for the operation of the asynchronous machine, which always consumes reactive power, is supplied by the network. The possibilities of voltage and frequency control will be presented, using continuous control, applied in an auxiliary resistive ballast load, through the use of a thyristorized three-phase AC controller, which employs the arrangement of thyristors in antiparallel by phase. Also, switched control will be presented in the work with the use of binary logic to switching auxiliary loads, with the advantage that in this case, unlike the first alternative using continuous control, there is no generation of harmonics by the auxiliary load. Therefore, in the first alternative, the power control of the auxiliary load is carried out by means of a change in the effective value of the voltage applied to the load, thus characterizing the controlled load, while in the alternating switched load system, the voltage is not varied, by applying of the machine voltage in the loads of different powers, for instance in number of four, which are thus inserted for switched control, according to binary logic to be presented. It should be noted that the auxiliary load is inserted in parallel with the main load of the generator, and when the main load is decreased, there is an increase of the auxiliary load and vice versa, ie the generator always sees an active load approximately constant, thus maintaining the machine voltage and the frequency changing in an acceptable range.

**KEYWORDS:** Three-phase induction machine (MIT), isolated asynchronous three-phase generator operation, binary logic, hysteresis control, ballast load.

## 1. INTRODUÇÃO

Na máquina assíncrona, a velocidade mecânica é diferente da velocidade síncrona do campo girante. Para funcionamento como motor, a velocidade mecânica de eixo do motor é menor que a velocidade do campo girante (escorregamento positivo), ao passo que para funcionamento como gerador, ocorre o contrário, ou seja, a velocidade mecânica de eixo da máquina é maior que a velocidade do campo girante (escorregamento negativo). Assim sendo, ou seja, para a máquina funcionando como gerador, ocorre que a velocidade do campo girante relacionado diretamente a esta frequência de alimentação da máquina, é sempre menor que a velocidade mecânica (funcionamento da máquina assíncrona como gerador). Desta maneira há geração de potência ativa pela máquina, mas quanto à potência reativa, há sempre consumo de potência reativa, para que a máquina possa funcionar gerando potência ativa (funcionamento como gerador), ou consumindo potência ativa do sistema (funcionamento como motor). A máquina primária fornece, portanto, potência mecânica de eixo, para que a máquina faça a conversão desta potência mecânica de eixo em potência elétrica, funcionamento então da máquina como gerador. Para funcionamento como motor, os fluxos de potência se invertem, ou seja, a máquina absorve potência elétrica da rede e converte em potência mecânica de eixo, mas em ambos os casos, ou seja, funcionamento como motor ou como gerador, as potências de saída são menores, devido aos rendimentos dos funcionamentos, quer seja como gerador ou como motor. A potência ativa pode ser alterada pelo aumento ou diminuição do escorregamento, pelo aumento ou diminuição da velocidade da máquina assíncrona, acionada pela máquina primária, acoplamento eixo a eixo, conforme se queira aumentar ou diminuir, respectivamente a contribuição da potência ativa do gerador assíncrono. A máquina assíncrona, sempre consome potência reativa. Ela pode gerar potência ativa no caso de funcionamento como gerador. O escorregamento é dado pela eq. (1). Para escorregamento positivo tem-se o funcionamento da máquina assíncrona como motor. Para funcionamento como gerador o escorregamento é negativo. A Figura 1 ilustra a curva de conjugado versus rotação [1], [4],[5], [7], [10], [11], [12], [14], [17], para máquina assíncrona trifásica de indução.

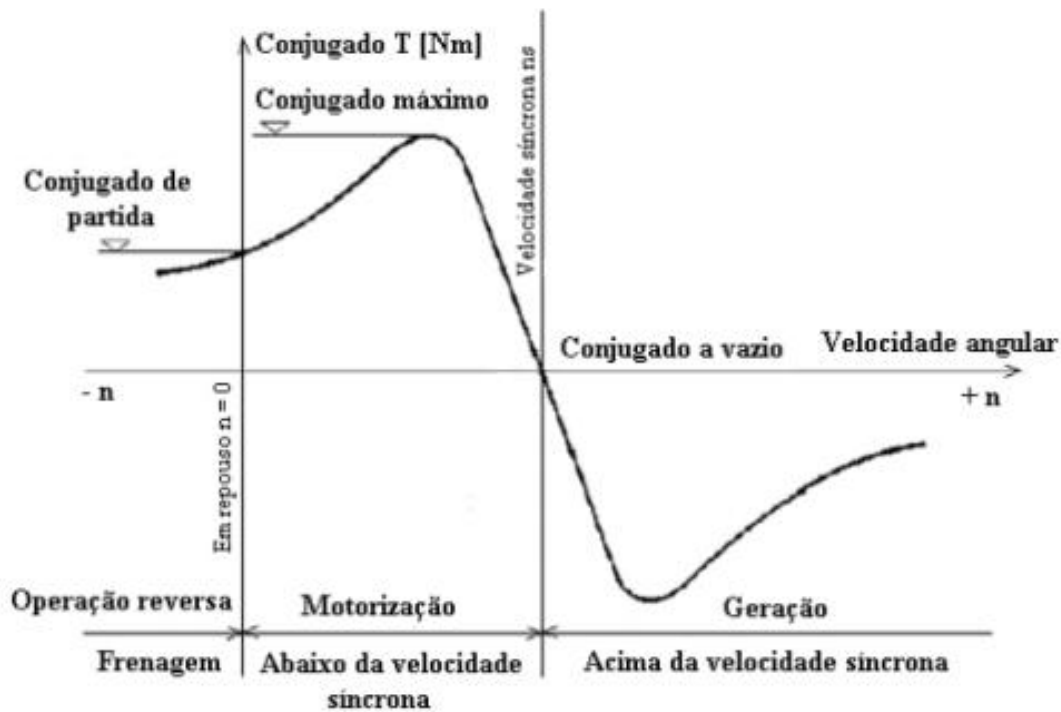


Figura 1 : Curva conjugado versus rotação, para máquina assíncrona de indução.

$$s = (n_s - n_r) / n_s \quad (1)$$

Onde:

$n_s$  é a rotação síncrona do campo girante dada pela eq. (2),

$s$  é o escorregamento,

$f$  é a frequência,

$p$  é o número de pares de pólos da máquina e

$n_r$  é a rotação rotórica da máquina.

$$n_s = 60f/p \quad (2)$$

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

A geração isolada em uma microcentral hidrelétrica utilizando carga lastro para os geradores tem sido objeto de pesquisa. Como metodologia de controle será utilizada uma carga auxiliar lastro, operando em paralelo com a carga principal, de tal maneira que quando se insere carga principal a carga lastro é automaticamente diminuída e vice-versa. Com esta técnica, o gerador enxerga sempre uma carga ativa aproximadamente constante, o que propiciará que o valor eficaz da tensão e frequência da tensão fornecida pelo gerador, fiquem mantidos em valores aproximadamente constantes. Uma estrutura de controle que utiliza apenas uma malha de controle de tensão mostrou-se mais robusta que um sistema que utiliza duas malhas de controle. A tensão ficará automaticamente regulada em valor constante e a frequência variará em uma pequena faixa aceitável para cargas do meio rural. Uma aplicação foi realizada Laboratório Avançado para Microcentrais Hidrelétricas do Ministério de Minas e Energia. O Laboratório Avançado para Microcentrais Hidrelétricas do Ministério de Minas e Energia está instalado na Fazenda Boa Esperança. Esta fazenda tem uma área de 211 hectares, na Serra da Mantiqueira, no Município de Delfim Moreira no sul do Estado de Minas Gerais. Com uma demanda média de 13kW, funcionando 24 horas por dia. A microcentral a gerador de indução instalada nesta fazenda é um modelo que pode ser implementado por outras comunidades rurais. Neste Laboratório, a microcentral a gerador de indução não utiliza regulador hidráulico de velocidade. Isto significa que a válvula de admissão de água, de operação manual, localizada na tubulação forçada opera em uma posição fixa, sem necessidade de mão-de-obra para sua operação. Na partida e na parada da microcentral, sim, há necessidade de mão-de-obra para a operação desta válvula. Porém, uma vez atingindo-se o regime permanente, não haverá mais necessidade de mão-de-obra para a operação desta válvula. Um sistema controle foi implementado para um motor de indução de 45[kW] funcionando como gerador, cuja máquina primária é uma bomba funcionando como turbina (BFT). Este sistema de controle utiliza uma malha de controle de tensão que torna estável a tensão gerada e estreita a variação de frequência em uma faixa aceitável para cargas elétricas usadas em propriedades rurais. Isto foi possível devido à presença da carga lastro [8], [9], [16]. A carga é controlada por um conversor CA-CA com tiristores em antiparalelo [13]. A Figura 2 ilustra o arranjo utilizando carga auxiliar controlada (lastro). O Banco de capacitores ligado em delta tem o total de 30[ $\mu$ F] por fase. Caso o gerador esteja em operação interligada com a rede o banco de capacitores não é necessário [18], [19], [22].

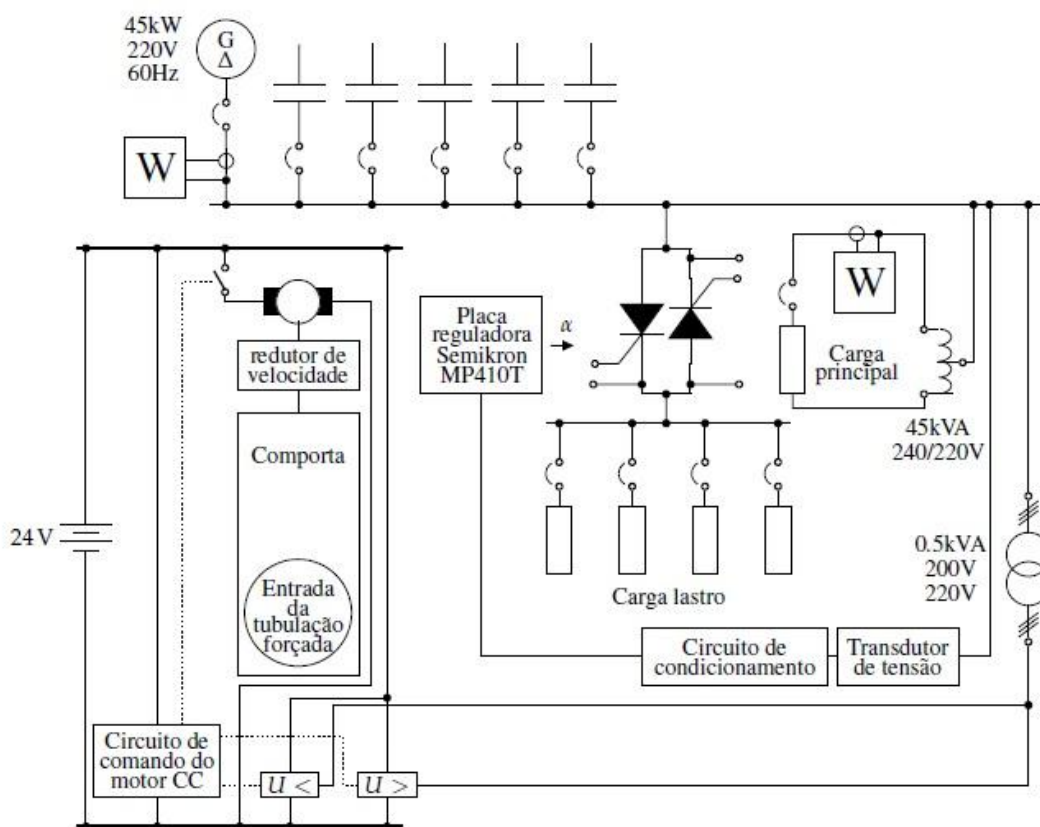


Figura 2: Diagrama unifilar de sistema com carga lastro controlada

Relés de subtensão e sobretensão supervisionam a tensão do gerador. Um transformador trifásico isolador conecta-os relés ao barramento do gerador. Estes relés são alimentados em 24V por um barramento de corrente contínua. Caso ocorra uma situação de subtensão ou de sobretensão o sistema de em corrente contínua permitirá o fechamento imediato da comporta hidráulica instalada na entrada da tubulação forçada, mostrada na Figura 3. Esta comporta hidráulica é acionada por um motor de corrente contínua que também é alimentado pelo barramento de 24V. Caso ocorra uma situação de subtensão ou sobretensão os relés de subtensão e sobretensão comutam internamente um contato. O sinal de comutação deste contato é enviado para um circuito de comando, o qual também é alimentado pelo barramento de 24V. O circuito de comando, por sua vez, aciona um contator que fecha seus contatos principais e faz a tensão do barramento de 24V chegar aos terminais do motor de corrente contínua para que a comporta hidráulica seja imediatamente fechada.



Figura 3: Comporta instalada na entrada da tubulação forçada

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra o resultado obtido na fazenda Boa Esperança, na tensão de saída do gerador de indução, para entrada e saída de carga, no caso uma câmara frigorífica da fábrica de gelo da fazenda, potência 3[kW], onde se pode observar a perfeita atuação do controle de tensão de maneira estável e com rapidez bem satisfatória, para entrada e saída de carga principal. [2],

[15]

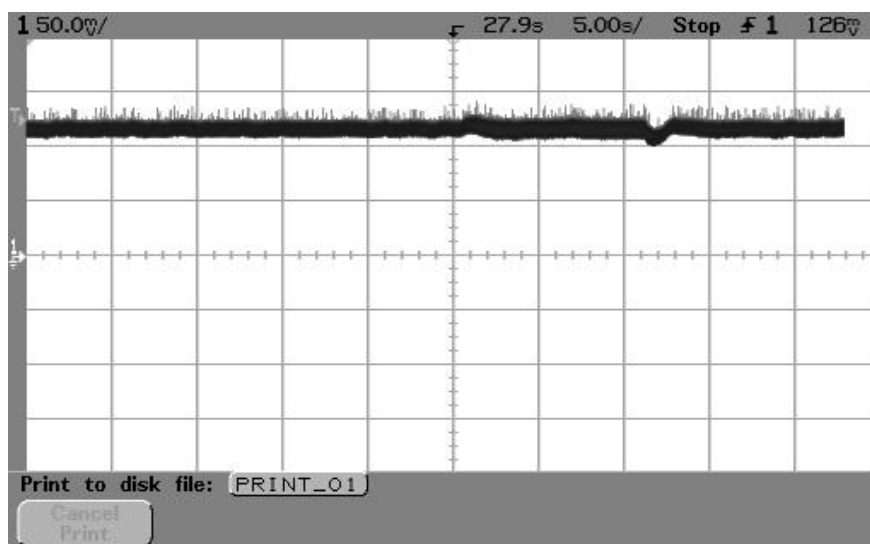


Figura 4: Resposta obtida da tensão da máquina, para entrada e saída de carga principal- Fazenda Boa Esperança.

Como proposta alternativa de continuação desta pesquisa, tem-se a possibilidade de utilização de controle chaveado utilizando, por exemplo quatro cargas ligadas em paralelo com a carga principal, conforme mostrado na Figura 5.

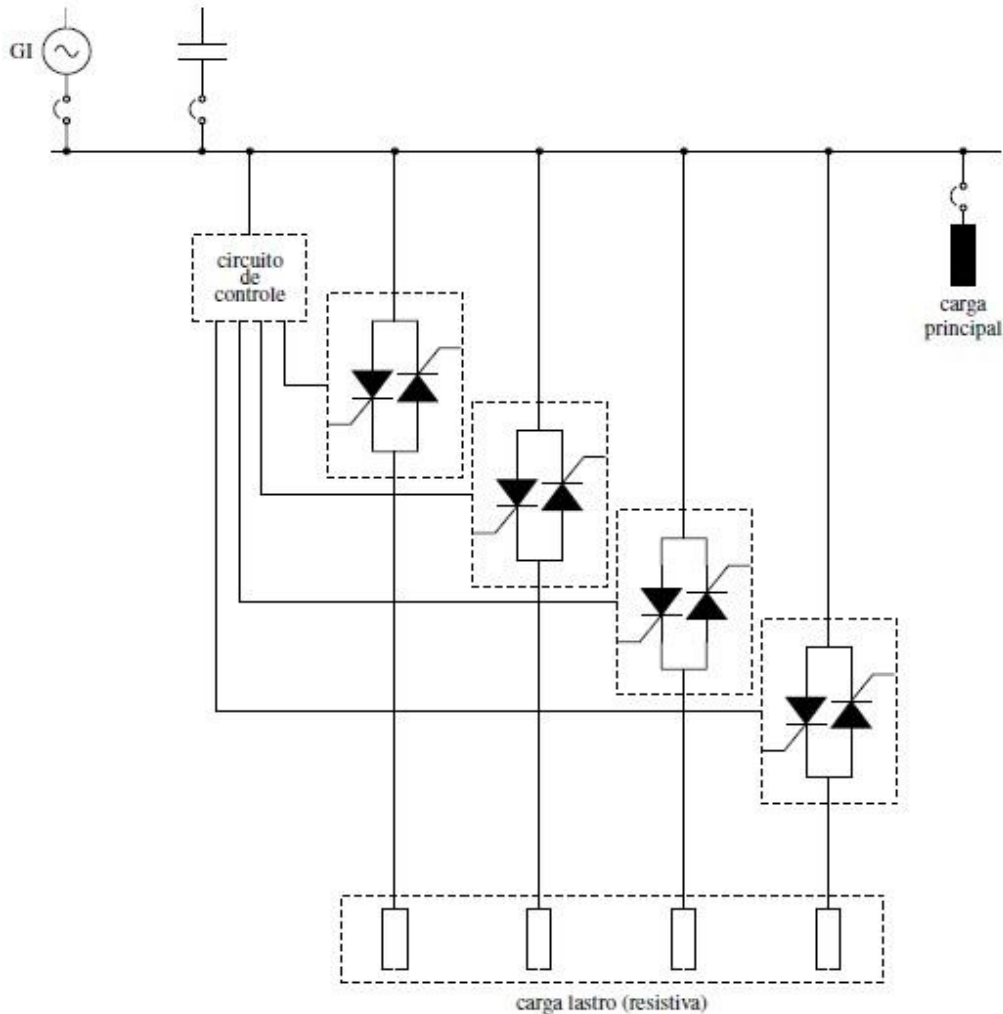


Figura 5 : Arranjo proposto para controle com carga chaveada

Pode-se constatar na Figura 5, que quatro cargas auxiliares resistivas, ligadas em estrela, em paralelo, são conectadas aos terminais de saída do gerador assíncrono. A carga principal é representada ligada em triângulo. As chaves estáticas, em número de quatro, constituídas por tiristores em anti-paralelo por fase para inserções das cargas auxiliares é mostrada na Figura 6.





Figura 6: Chave estática

Os dados das máquinas de corrente contínua (máquina primária) e do gerador assíncrono conectado à rede são ilustrados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Dados da máquina primária MCC

Fabricante	ELETROMÁQUINAS ANEL S/A
Tipo	CG1-4
Potência	1,7 [kW]
Tensão nominal de armadura	220 [V]
Rotação	1500 [RPM]
Corrente nominal de armadura	7,72[A]
Corrente de campo máxima	0,6[A]

Tabela 2. Dados do gerador de indução (Motor de indução usado como gerador )

Fabricante	EBERLE
Tipo	AS 90L
Potência	1,2[CV]
Tensão	220[V]
Corrente Nominal	3,6[A]
Frequencia	60[Hz]
Rotações por minuto	1740[RPM]
Isolação	F
Proteção	IP44

A Tabela 3 ilustra as possíveis combinações a serem utilizadas, como exemplo, para inserções das cargas lastro, empregando lógica binária, bem como apresenta possíveis potências da mesmas, seguindo aproximadamente a regra P; P/2; P/4; P/8, com a última carga apresentando potência ligeiramente superior a P/8, sendo P a potência da primeira carga e igual a 300[W]. A carga principal tem potência máxima compatível com a soma das potências das cargas auxiliares, por exemplo 600[W].

TABELA 3 – POSSÍVEIS COMBINAÇÕES PARA A CARGA LASTRO COM LÓGICA BINÁRIA

Número Decimal	Carga auxiliar			
	300[W]	147[W]	75[W]	45[W]
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

A lógica a ser desenvolvida em um programa utilizando linguagem C++ , microcomputador e placa de aquisição de dados PCL C++ da Advantech é a de utilizar quatro saídas digitais da placa Advantech PCL 711, que quando ativadas fornecem em sua saída digital um sinal de 5[V], corrente contínua. Estas tensões são ligadas no sinal de ativação das chaves estáticas, para inserções ou retiradas das cargas auxiliares, respectivamente 1, 2, 3, 4, conforme se tenham respectivamente tensões das quatro saídas digitais ativadas em 5[V], ou desativadas em 0[V]. Portanto, tem-se um contador que pode subir ou descer, com lógica de controle a ser desenvolvida no programa de controle [3], [6]. Por exemplo, se a carga principal é aumentada, há queda de tensão nos terminais da máquina, deve-se então diminuir a carga auxiliar, portanto o contador sobe uma posição e há um tempo de verificação, por tempo de espera do programa,

para verificação se a tensão está dentro da janela de tensão máxima e mínima estipulada no programa. Se a tensão, obtida por intermédio do transdutor de tensão, sendo esta uma entrada analógica da placa, estiver dentro desta janela, não há movimentação do contador. Caso contrário, o contador se movimenta, pela inserção lógica das cargas auxiliares. Caso a carga principal seja diminuída, ocorre o contrário, ou seja, aumenta-se a tensão terminal da máquina e o contador se movimenta de uma posição, para baixo, havendo, portanto, aumento da carga lastro, para compensação necessária. Portanto, quando a tensão da máquina está superior à tensão máxima da janela, há movimentação do contador para baixo, com aumento da carga auxiliar e quando está inferior à tensão mínima da janela, há movimentação do contador para cima, com diminuição da carga auxiliar. Esta técnica de controle é portanto do tipo controle por histerese, controle chaveado, sem que haja geração de harmônicos pela carga, vantagem principal desta técnica descrita.

A Figura 7 mostra o grupo motor gerador a ser utilizado.



Figura 7: Grupo motor gerador a ser utilizado

## 6. CONCLUSÕES

A proposta do trabalho apresenta uma alternativa interessante para ser aplicada em geração distribuída, uma vez que não há geração de harmônicos pela carga auxiliar, controle tipo chaveado e não contínuo como o que inicialmente foi implementado e está em funcionamento na Fazenda Boa Esperança [20]. Uma implementação anterior inicial desta técnica foi realizada utilizando controle de frequência [6], [21], ao invés de controle de tensão, mas para aplicações gerais o controle de tensão é bem mais interessante, devido a que as cargas são mais sensíveis e operam melhor quando a tensão é mantida constante, podendo a frequência variar em uma faixa

aceitável. No controle chaveado por histerese proposto para tensão, estabelece-se uma janela de operação, tensão inferior e tensão superior aceitáveis, por exemplo de cinco volts, para mais ou para menos da tensão nominal. Estando a tensão da máquina dentro desta janela, não há alteração da carga auxiliar, pois o contador permanece fixo, sem movimentação. Portanto ideia, interessante para que nosso grupo de pesquisa e desenvolvimento possa disponibilizar esta técnica mais interessante, sem geração de harmônicos por parte da carga auxiliar para aplicações em controle de tensão, geração isolada por intermédio da utilização de gerador de indução.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos dos laboratórios didáticos de eletricidade da UNIFEI, que sempre auxiliam, para bom êxito dos trabalhos de pesquisa de nosso grupo de pesquisa e desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS

1. A. J. J. Rezek, “Fundamentos Básicos de Máquinas Elétricas: teoria e ensaios”, Synergia, Acta, Editoras, 2011.
2. P. P. C. Mendes, “Estudo de Estabilidade de Sistemas Elétricos”, 2006.
3. DatasheetATmega8, ATMEL
4. A. E. Fitzgerald, A. E. Kingsley, C. Jr; Kusko, A, “Máquinas Elétricas”, Mcgraw-Hill do Brasil Ltda, 1997
5. M. G. Simões, F. A. Farret, Alternative Energy Systems, Design and Analysis with Induction Generators, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2ª Edição, Flórida, 1995.
6. G.R. Marques, L. H. Simões “Controle de frequência do gerador de indução utilizando lógica binária”, trabalho final de graduação (TFG), engenharia elétrica, UNIFEI, outubro, 2013.
7. F. A. Farret, M. G. Simões, “Integration of Alternative Source of Energy”, IEEE Press John Wiley Interscience, Hoboken, New Jersey, 2006.
8. A. V. Braga, “Modelagem, ajuste e implementação de um sistema de controle de tensão para o gerador de indução”, Dissertação MSc pela Universidade Federal de Itajubá, <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0031621.pdf>, 2002.
9. A. V. Braga, A. J. J. Rezek, C. A. D. Coelho, E. C. Bortoni, V. F. Silva, J. A. Cortez, C. A. M. Pinheiro, “Modelagem, ajuste e implementação de um sistema de compensação reativa – SVC:

caso prático de aplicação em gerador de indução”, Congresso Brasileiro de Automática( CBA), Gramado/RS, 2004.

10. M. Ors, “Voltage control of a self-excited induction generator”, IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. Vol. 3, pp 281-286, 22-25 May 2008.

11. F. D. Wijaia, T. Isobe, K. Usuki, J. A. Wilk, R. Shimada, “A new automatic voltage regulator of self-excited induction generator using SVC magnetic energy recovery switch”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp 697-703, 15-19 June 2008.

12. R. Grumbaum, P. Halvarsson, D. Larsson, P. R. Jones, “Conditioning of power grids serving offshore wind farms based on asynchronous generators”, IEEE Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives(PEMD), Vol. 1, pp 34-39, 31 March - 2 April 2004.

13. I. Barbi, *Eletronica de Potencia*, Edição do autor, Florianópolis, 2000.

14. J. M. Chapallaz, J. D. Ghali, P. Eichenberger, G. Fischer, *Manual on Induction Motors Used as Generators*, MHPG Series, 1990.

15. F. Fröhr, F. Orttenger, *Introducción al Control Electrónico*, Siemens, Marcombo S. A., 1986.

16. A. J. J. Rezek, A. V. Braga, A. N. C. Viana, D. M. Medeiros, “Operação do gerador de indução com controle de tensão e frequência”. VI Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Belo Horizonte, MG, Brasil, abril 2008.

17. T. Ahmed, K. Nishida, M. Nakaoka, L. H. Woo, “SVC and AC load voltage regulation scheme for DC outputted three-phase induction generator”, The 4<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference, (IPEMC), Vol. 3, pp 1189-1194, 14-16 Aug. 2004.

18. L.F.B. Costa. Gerador de indução monofásico em sua operação interligada à rede. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal de Itajubá. Orientador: Angelo José Junqueira Rezek.

19. A.V.Braga., A.J.J. Rezek, C. G. Ogoulola, O. G. Gnonhoue, G.L. T. Filho, R. Di .L. Corrêa “Proposta de operação isolada e interligada de uma microcentral, com previsão de uma possível futura disponibilização de energia excedente para a rede”. XI Conferência de Pequenas Centrais Hidrelétricas, 2017, São Paulo/SP.

20. A.V.Braga, A.J.J Rezek,, V.F. Silva, A.N.C. Viana, E.C.Bortoni, W.D.C. Sanchez, P.F. Ribeiro, “Isolated induction generator in a rural Brazilian area: Field performance tests”. *Renewable Energy*<sup>JCR</sup>, v.83, p.1352-1361, 2015.

05 e 06  
JUNHO 2019



21. G. R. Marques, L. H Simões, J. M. E. Vicente, J.C.G. Rodrigues, D. F. Bernardes, A. J. J. Rezek, A.V.Braga “Controle de frequência do gerador de indução em operação isolada, utilizando lógica binária,. PCH Notícias & SHP News, v. 61, p. 8-14, 2014.

22. A. V. Braga, A.J.J Rezek , L. F. Brum, J. M. E. Vicente. “Operação isolada e interligada de geradores de indução monofásicos e trifásicos”. PCH Notícias & SHP News, v. 78, p. 23-25, 2018.