

# Sistema Autônomo de Conversão Eólico-Elétrico a Partir de uma Turbina do Tipo Multipás

L. D. Bezerra<sup>1</sup>, A. A. Pinheiro<sup>1</sup>, Isaac D. P. de Souza<sup>1</sup>, D. V. Shimoda<sup>1</sup>, C. M. T. Cruz<sup>1</sup>, D. S. Oliveira Jr<sup>1</sup>, F. L. M. Antunes<sup>1</sup>, R. E. F. Q. Nogueira<sup>1</sup>, R. P.T. Bascopé<sup>1</sup>, E. M. Sá Jr<sup>1</sup>, G. J. de Almeida<sup>2</sup>

**Resumo** – Este artigo apresenta a concepção de um sistema autônomo de energia elétrica usando uma turbina eólica do tipo multipás. A estrutura do sistema proposto consiste de uma turbina do tipo multipás, um gerador síncrono de ímã permanente, um conversor controlador de carga das baterias que permite a operação do conjunto turbina-gerador no ponto de máxima potência (*Maximum Power Point-MPP*), um banco de baterias, e um inversor. A Turbina eólica do tipo multipás também denominada por *american multiblade turbine*, é fabricado artesanalmente nas regiões norte e nordeste brasileiro, onde o fluxo de vento é abundante, para aplicações em sistema de bombeamento de água. Neste trabalho é aplicado na geração de energia elétrica. A pesquisa se enquadra dentro da resolução normativa N° 83, de 20 de setembro de 2004, da agência nacional de energia elétrica – ANEEL, que estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por intermédio de Sistemas Individuais de Geração de energia elétrica com Fontes Intermitentes – SIGFI [40]. Todos os estágios de processamento de energia são descritos, assim como os resultados de simulação são apresentados.

**Palavras-chave** – Boost, Elevador, Inverter, Multipás, Multiblade-turbine, Sistemas Autônomos, Stand-alone, MPPT, Multiblade-turbine.

## I. INTRODUÇÃO

Conforme dados extraídos do Censo de 2000 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), existiam aproximadamente dois milhões de domicílios rurais não atendidos por energia elétrica, ou seja, aproximadamente dez milhões de brasileiros vivem no meio rural sem acesso a esse serviço público [32],[35],[36] e [40].

A Figura 1 mostra a situação de cada estado quanto ao nível de não atendimento de energia elétrica no meio rural. Observando-a, verifica-se que os estados das regiões norte e nordeste apresentam maiores índices de não atendimento com a energia elétrica.

Tendo em vista essa situação vivida pela população rural, excluída do abastecimento elétrico, o Governo Federal elaborou o programa LUZ PARA TODOS, que objetiva garantir o acesso ao serviço público de energia elétrica a todos os domicílios e estabelecimentos do meio rural e melhorar a

prestação de serviço à população até o ano de 2008. Esse programa se integra a outros programas sociais de desenvolvimento rural realizados pelo governo federal e pelos estados, para assegurar que o esforço de eletrificação do campo resulte em incremento da produção agrícola, proporcionando o crescimento da demanda por energia elétrica, o aumento de renda e a inclusão social da população beneficiada.

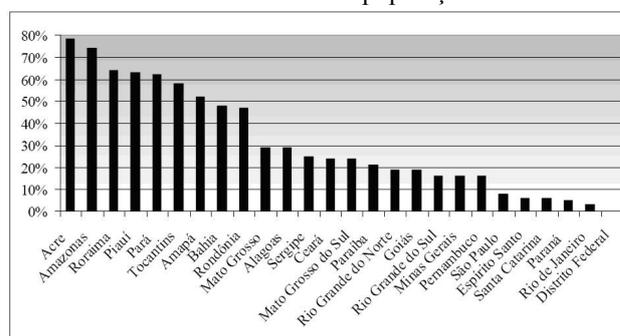


Figura 1. Índices percentuais de não atendimento rural, por estado da federação.

A possibilidade para o atendimento à população alvo é tanto a extensão de rede convencional, como os sistemas de geração descentralizados, com redes isoladas ou sistemas individuais. A AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) estabelece os procedimentos e condições para os sistemas de geração descentralizados individuais em sua resolução normativa N° 83, de 20 de setembro de 2004, que serve de base para as especificações do projeto [40].

Esses sistemas são nomeados de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI). Nas condições gerais da resolução são colocadas como características obrigatórias aos SIGFI, o fornecimento da energia elétrica em corrente alternada senoidal, com o mesmo padrão e tensão e frequência predominantes nos municípios da localidade do sistema e deve estar enquadrado em uma das classes de atendimento explicitadas na Tabela I.

Tabela I. Classificação e disponibilidade de atendimento.

Classe de Atendimento	Consumo diário de referência (Wh/dia)	Autonomia mínima (Dias)	Potência mínima disponibilizada (W)	Disponibilidade mensal (kWh)
SIGFI 13	435	2	250	13
SIGFI 30	1000	2	500	30
SIGFI 45	1500	2	700	45
SIGFI 60	2000	2	1000	60
SIGFI 80	2650	2	1250	80

<sup>1</sup>Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

<sup>1</sup>Trabalham na “Universidade Federal do Ceará - Departamento de Engenharia Elétrica – Grupo de Processamento de Energia e Controle - GPEC” (e-mails: daniel@dee.ufc.br; ; cicero@dee.ufc.br; demercil@dee.ufc.br; fantunes@dee.ufc.br; rene@dee.ufc.br, emilio@ufc.br).

<sup>2</sup>G. J. de Almeida, trabalha na “Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF – Divisão de Projetos de Fontes Alternativas de Geração – DEFA” (e-mail: almeida@chesf.gov.br).

Com base nessa resolução normativa é retirada a potência e a característica da saída do projeto. Como o projeto é realizado no estado do Ceará, a tensão e a frequência de saída

são de acordo com os padrões da Companhia Energética do Ceará (COELCE), 220V CA e 60 Hz. De acordo a tabela de classificação e disponibilidade apresentada pela ANEEL na normativa, foi escolhida o SIGFI-30 que requer o fornecimento ao usuário de até 30kWh por mês sem a necessidade da instalação de instrumentos de medição para realizar o faturamento do usuário. A energia processada pelo sistema esta diretamente relacionada à disponibilidade do vento, a transformação de energia pela turbina e o gerador, a capacidade dos acumuladores de energia, e a eficiência do sistema de processamento de energia elétrica antes de chegar ao usuário.

O trabalho é o resultado do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico da CHESF – Ciclo 2003/2004, assinado entre a Associação Técnico-Científica Engenheiro Paulo de Frontin – ASTEF, e a Universidade Federal do Ceará - UFC. O título do projeto é “Módulo de Geração Elétrica para interligação a Turbina Eólica do Tipo Multipás”.

## II. SISTEMA PROPOSTO

O sistema a ser estudado e desenvolvido neste projeto é apresentado na forma de diagrama de blocos na Figura 2. O sistema é composto da turbina eólica multipás, o gerador trifásico síncrono de imã permanente, o conversor controlador de carga das baterias, o banco de baterias e o inversor monofásico.

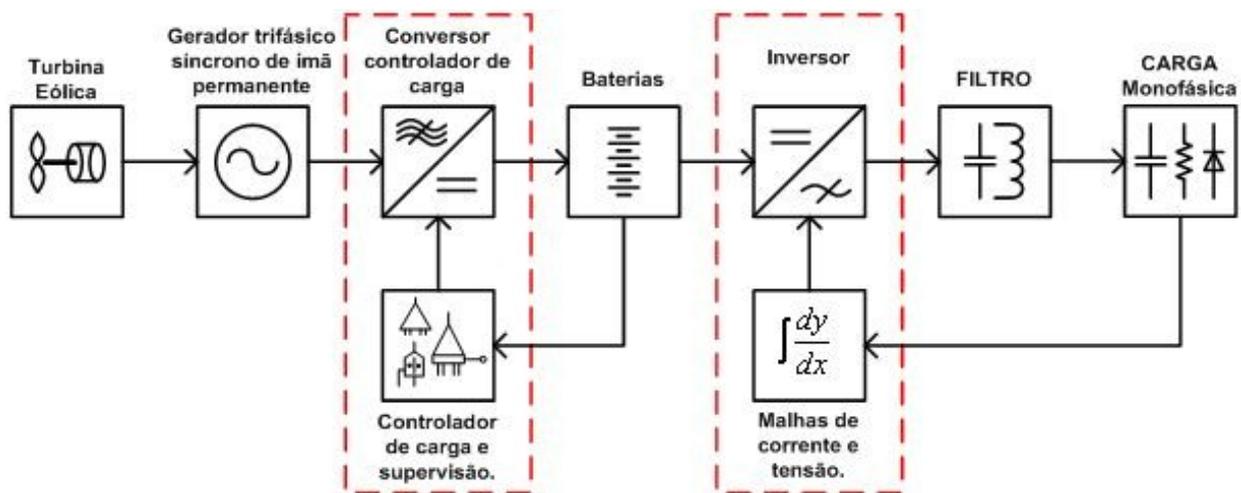


Figura 2. Visualização em diagrama de blocos do sistema proposto.

## III. TURBINA MULTIPÁS

O modelo mais tradicional de cata-vento em funcionamento ainda hoje, é o cata-vento ou turbina multipás. Consiste de um rotor formado por lâminas ou pás que capturam o vento e um dispositivo mecânico para transmitir a energia a uma bomba de êmbolo, como mostra a Figura 3.

Milhões desses equipamentos foram usados nos Estados Unidos para bombear água para uso doméstico e animal. Eles foram essenciais para o rápido desenvolvimento das Grandes Planícies. Atualmente, muitos desses moinhos clássicos foram substituídos por bombas a diesel ou elétricas [11].

Embora o uso de cata-ventos nos países industrializados tenha declinado bastante, ele não foi totalmente abandonado. O cata-vento americano ainda é fabricado e estima-se que cerca de um milhão deles esteja em uso nos Estados Unidos, na Argentina, Austrália e África do Sul. Eles fornecem água para uso doméstico, criação de animais e, em alguns casos, para irrigação de pequenas áreas de plantações [11].

Entre 1920 e 1940, o cata-vento multipás clássico foi introduzido, em grande quantidade, em vários países em desenvolvimento, tais como Marrocos, Tunísia, Somália, Moçambique e Mali. No entanto, a maioria deles foi abandonada

nos anos 50, quando os combustíveis a base de petróleo se tornaram disponíveis em abundância e a custo relativamente baixo [11].

Com o aumento do preço do petróleo nos anos 70, o interesse pelo bombeamento de água por meio de cata-ventos ressurgiu. Entretanto, o custo elevado de importação desses equipamentos e os problemas com a manutenção dos mesmos, impediram sua maior disseminação nos países mais pobres.

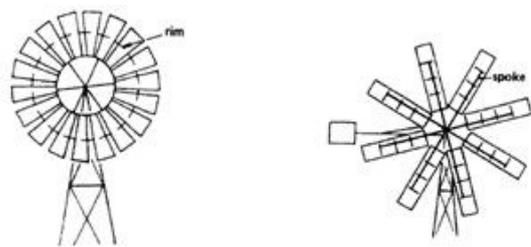


Figura 3. Rotor multipás clássico (esq.) e rotor moderno (dir.) [11].

A turbina ou cata-ventos multipás consiste tipicamente dos seguintes componentes:

1- O rotor, que transforma a energia do vento em energia mecânica;

2- A transmissão, que transmite a energia mecânica do rotor a bomba, o que pode envolver conversões de energia intermediárias;

3- O freio, sistema de segurança que protege o cata-vento durante rajadas de vento e temporais.

O rotor é a parte fundamental da turbina. É constituído por pás ou lâminas, que são placas de aço encurvadas. Algumas turbinas utilizam velas em vez de pás. No caso dos cata-ventos multipás ou “americanos” clássicos, os rotores possuem 15, 18, 24 e até 30 lâminas, geralmente suportadas por uma estrutura de aros (*rim*) e raios (*spokes*) metálicos. Esses rotores fornecem a máxima potência ao eixo quando a velocidade das extremidades das pás (*blade tip speed*) é aproximadamente igual à velocidade do vento (*wind speed*). Projetos mais modernos têm reduzido o número de pás para 4, 6, 8 ou 12, sendo estas suportadas por estruturas mais simples, contendo apenas raios, ou seja, sem aros. A Figura 3 mostra os dois modelos de rotores [11].

Como todo mecanismo motriz primário, a turbina multipás possui parâmetros ou características importantes que permitem avaliar e comparar seu funcionamento. Esses parâmetros são expressos em termos de diagramas de coeficiente de **torque X velocidade** e coeficiente de **potência X velocidade**. Essas curvas dependem da velocidade do vento. Com o intuito de simplificar a representação desses diagramas, os seguintes coeficientes são definidos:

A razão de velocidade de ponta ( $\lambda$ ) é definida em (1) pela relação entre a velocidade da ponta da pá ( $\omega R$ ) e a velocidade do vento ( $v$ ).

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (1)$$

O coeficiente de potência ( $C_p$ ) definido em (2) é a razão entre a potência mecânica fornecida pela turbina ( $P$ ) e a potência de referência fornecida pelo vento (a potência do vento passando pela área varrida,  $A$ , pelo rotor). O valor de  $C_p$  é máximo quando  $\lambda$  é igual ao valor de projeto ( $\lambda_a$ ). Esse valor de coeficiente de potência é normalmente entre 0,3 e 0,4. Em (2),  $\rho$  é a densidade do ar.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A v^3} \quad (2)$$

O coeficiente de torque ( $C_q$ ) é a razão entre o torque fornecido pelo rotor da turbina ( $T$ ) e um torque de referência do vento, o qual é definida em (3).

$$C_q = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A v^2 R} \quad (3)$$

A Figura 4 mostra algumas curvas características de turbinas multipás convencionais e de turbinas com projeto moderno. As principais vantagens das turbinas modernas são: o menor peso, e o menor torque necessário para sua partida.

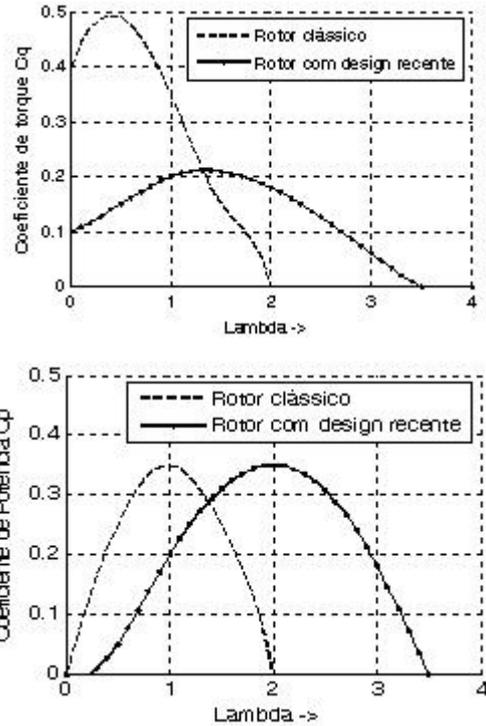


Figura 4. Característica coeficiente de torque-velocidade (sup.) e coeficiente de potência-velocidade (inf.) [11].

Apesar do uso das tradicionais turbinas multipás ao longo dos séculos ter se mantido restrito quase que exclusivamente ao bombeamento de água, com raríssimas exceções, trabalhos científicos recentes têm ressaltado a possibilidade e a oportunidade de se utilizar esses equipamentos para a geração de energia elétrica. Menet [30] e outros no ano 2001, chamaram a atenção para um novo critério de seleção de turbinas, baseado na confiabilidade mecânica, que considera os cata-ventos multipás viáveis para aplicações em geração de energia elétrica. Khan [31] e outros no ano 2005, por sua vez, demonstraram que, introduzindo-se modificações em gerador síncrono de ímã permanente, é possível a geração de energia elétrica com uma turbina de 12 pás em termos competitivos.

#### A. Estimação da Potência de uma Turbina Eólica em Condições Ideais

Aplicando a equação da energia na forma integral e utilizando as velocidades com o fator de interferência, a potência idealizada  $P_{ideal}$  pode ser estimada por (4). Sendo  $\rho_{ar}$  a densidade do ar ( $1,2 \text{ kg/m}^3$ ),  $V$  a velocidade do vento ( $5 \text{ m/s}$ ),  $r$  o raio do rotor formado por pás e  $a$  o fator de interferência. Quanto maior o fator de interferência, maior é a perda de energia. Assim, as pás devem possuir um perfil aerodinâmico que permita minimizar o máximo possível essas perdas.

$$P_{ideal} = 2 \cdot \rho_{ar} \cdot V^3 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot a \cdot (1-a)^2 \quad (4)$$

Para uma turbina eólica de 18 pás com diâmetro de 3 m e considerando um perfil de pá com fator de interferência de 1/3, a potência idealizada é obtida por (5), [12] [13] [14].

$$P_{ideal} = 2 \cdot 1,2 \cdot 5^3 \cdot 3,14 \cdot 1,5^2 \cdot 0,33 \cdot (1-0,33)^2 = 313,98 \text{ W} \quad (5)$$

Para uma turbina eólica de 18 pás com diâmetro de 3 m e considerando um perfil de pá com fator de interferência de 1/2, a potência idealizada é obtida por (6).

$$P_{ideal} = 2 \cdot 1,2 \cdot 5^3 \cdot 3,14 \cdot 1,5^2 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,5)^2 = 264,94 \text{ W} \quad (6)$$

Devido às perdas mecânicas da caixa de engrenagem, ou polia, e as perdas na conversão da energia mecânica em energia elétrica do gerador, a potência média útil final pode ser estimada na ordem de 50 % da potência ideal.

A potência hidráulica pode ser determinada por (7). Sendo  $\rho$  a massa específica da água (1 kg/l em condições normais de pressão e temperatura),  $Q$  a vazão volumétrica em litros por hora,  $g$  a gravidade do local (adotado  $9,81 \text{ m/s}^2$ ) e  $H$  a altura da elevação (altura manométrica).

$$P_H = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \quad (7)$$

Um cata-vento convencional com diâmetro das pás de 3 m, para uma velocidade média do vento de 5 m/s e altura manométrica de 20 m, possui uma vazão de 39.000,00 litros por dia. Nestas condições, a potência hidráulica média é determinada por (8).

$$P_H = 1 \cdot 39000 \cdot 9,81 \cdot 20 = 7651800 \text{ J/dia} = 88,6 \text{ W} \quad (8)$$

Portanto, a estimativa da potência elétrica útil de um cata-vento de 3m de diâmetro é aproximadamente de 88,6W.

#### IV. GERADOR ELÉTRICO

Devido as características da turbina multipás, que apresenta alto torque e baixa rotação, é necessário um gerador que opere com baixas rotações de forma a evitar o uso de caixa de engrenagens ou polias, Assim é aumentada a vida útil do sistema, e reduzida a periodicidade da manutenção. Para as características mencionadas, o gerador que melhor se enquadra é o gerador síncrono de imã permanente com fluxo axial (*Permanent Synchronous Magnet Generator-PSMG*).

A máquina síncrona de imã permanente possui reduzidas dimensões e uma alta capacidade de gerar energia a baixas velocidades porque pode ser construído com um elevado número de pólos magnéticos. Por estes motivos esta tecnologia vem sendo bastante aplicada em sistemas eólicos de pequeno porte.

A máquina é simples, de custo baixo e tem uma alta eficiência. O uso de imãs de Neodímio-Ferro-Boro evidencia um pequeno tamanho e peso, bem como um alto carregamento magnético. Seu disco do rotor atua naturalmente como um ventilador, proporcionando uma boa ventilação para os enrolamentos do estator que operam com um alto carregamento elétrico. O enrolamento sem ranhuras determina baixos valores de indutâncias (mútuas e próprias), pois o entreferro magnético é necessariamente largo e a ranhura de ligação é logicamente ausente. Também, com um alto carregamento magnético, é possível gerar a força eletromotriz requerida usando um pequeno número de voltas por enrolamento, logo as resistências e indutâncias são baixas [29].

A configuração básica é mostrada na Figura 5 (sup.). Um simples estator toroidal carrega enrolamentos toroidais e sem ranhuras. O rotor se compõe de dois discos carregando imãs polarizados. Uma representação básica do fluxo magnético na máquina é mostrada na Figura 5 (inf.).

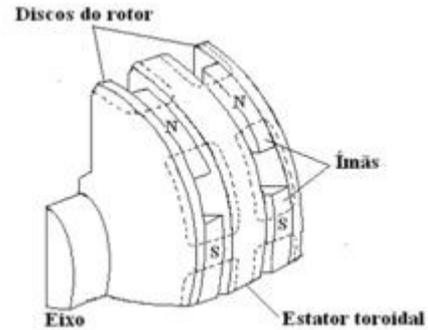
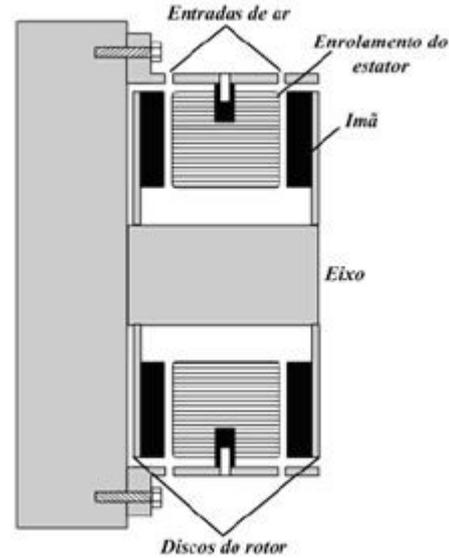


Figura 5. Vista da seção transversal da máquina (sup.), vista externa do PSMG (inf.).

A máquina síncrona de imã permanente foi modelada e simulada em [35] e [20]. Seu modelo é mostrado na Figura 6, cujos valores para o gerador a ser utilizado no projeto são determinados de forma experimental.

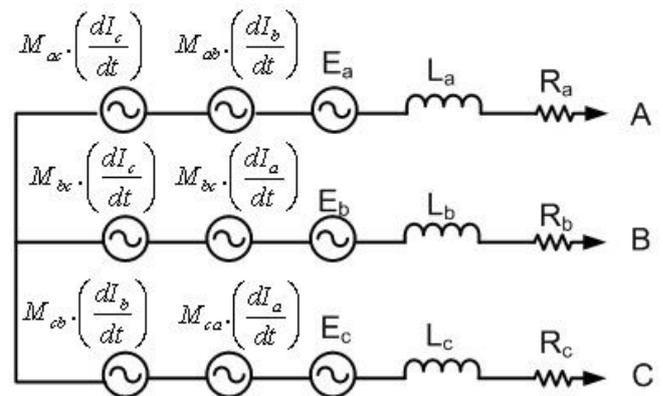


Figura 6. Modelo do gerador eólico.

Onde:

$E_a, E_b$  e  $E_c$  → forças eletromotrizes;

$R_a, R_b$  e  $R_c$  → resistências elétricas de fase;

$L_a, L_b$  e  $L_c$  → indutâncias próprias de fase;

$I_a, I_b$  e  $I_c$  → correntes eficazes de fase;

$M_{n,m}$  → indutância mútua entre os enrolamentos  $m$

e  $n$ .

A força eletromotriz induzida entre a fase e o neutro é dada pela equação (9). Onde  $K$  é a constante da máquina,  $\Phi$  é o fluxo magnético e  $\omega_g$  é a velocidade angular do rotor do gerador.

$$E = K \cdot \Phi \cdot \omega_g \quad (9)$$

As tensões fase-neutro eficazes ( $V_a, V_b, V_c$ ) produzidas pelo gerador eólico, de acordo com o modelo apresentado na Figura 6, são desenvolvidas em [20], e dadas em (10).

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{pmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} \quad (10)$$

O torque eletromagnético ( $T_e$ ) é dado por (11). As demais equações que se seguem foram obtidas em [35].

$$T_e = \frac{E_a \cdot I_a + E_b \cdot I_b + E_c \cdot I_c}{\omega_g} \quad (11)$$

A velocidade angular do rotor ( $\omega_g$ ) é dada pela derivada do ângulo que define a posição mecânica do rotor (em graus mecânicos), conforme (12).

$$\omega_g = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (12)$$

Por outro lado, a velocidade rotacional do rotor também pode ser obtida através (13).

$$\omega_g = \frac{d}{dt} \left( \frac{\theta_r}{P} \right) \quad (13)$$

O torque mecânico  $T_m$  é dado por (14).

$$T_m = T_e + B \cdot \omega_g + J \cdot \frac{d\omega_g}{dt} \quad (14)$$

Onde:

$T_m$  → torque mecânico;

$T_e$  → torque eletromagnético;

$B$  → coeficiente de atrito viscoso;

$\omega_g$  → velocidade angular do rotor;

$J$  → momento de inércia da massa girante;

$d/dt$  → operador diferencial.

## V. CONTROLADOR DE CARGA COM MPPT

Os sistemas isolados de pequeno porte, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias ou na forma de energia potencial gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados para sua posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida.

### A. Sistema Eólico com Controle de Máxima Potência

O controlador de carga é baseado no conversor CC-CC do tipo *boost* cujas etapas de operação são descritas posteriormente. O controlador proposto é mostrado na Figura 7.

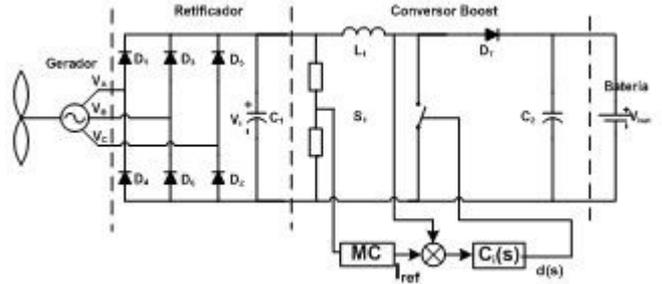


Figura 7. Diagrama de blocos do sistema de controle de máxima potência.

O circuito da Figura 7 permite o processo de seguimento da máxima potência a partir da medição da tensão de saída do retificador trifásico. Para cada valor de dessa tensão, uma tabela ou equação de interpolação define a corrente  $I_{ref}$  ou potência que pode ser extraída. Essa corrente de referência é então aplicada em um controlador de corrente  $C_1(s)$  que define o comportamento dinâmico e estático mais adequado do ciclo de trabalho ou razão cíclica de forma a drenar a corrente desejada do circuito.

A equação de interpolação ou tabela deve ser obtida pela simulação do sistema turbina-gerador para diferentes velocidades do vento, variando-se a impedância vista por este sistema. Como resultado destas simulações obtém-se as correntes e tensões ótimas respectivas a cada velocidade do vento. Outra possibilidade é o ajuste experimental destes parâmetros.

O diagrama de blocos indicado como “Conversor controlador de carga” mostrado na Figura 2 é dividido em dois blocos como mostra a Figura 8, onde no primeiro bloco encontra-se um retificador trifásico não-controlado convencional denominado na literatura de ponte de *Graetz* [2], e no segundo bloco encontra-se o conversor CC-CC *boost*. Os conversores de ambos os blocos são mostrados na Figura 9 juntamente com o gerador eólico-elétrico e baterias, e terão as seguintes funções no sistema de processamento de energia: retificar a tensão alternada gerada pelo gerador trifásico síncrono de ímã permanente, permitir a operação do gerador no ponto de máxima potência, e controlar o nível de carga (carregamento, equalização e proteções contra sobretensão e sobrecorrente) das baterias de armazenamento de energia elétrica.

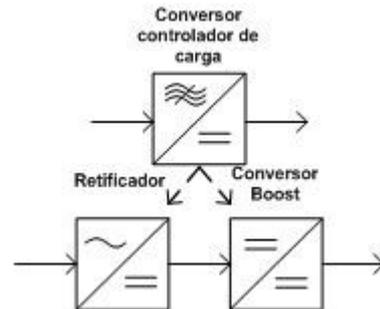


Figura 8. Diagrama de blocos do conversor controlador de carga.

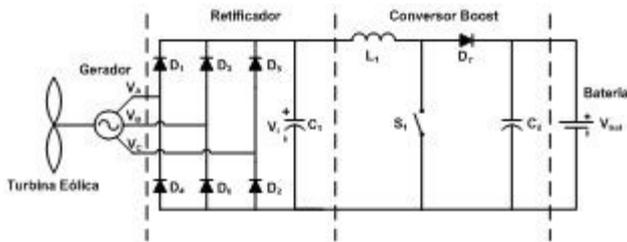


Figura 9. Retificador trifásico em série com um conversor boost.

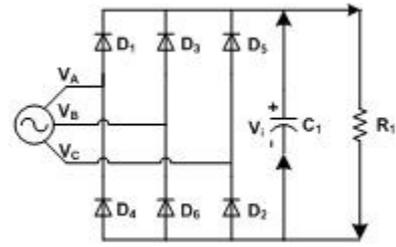
Para fins de simplicidade, os diodos são considerados ideais, ou seja, os diodos possuem tensão de polarização e corrente reversa nula. Já a carga é considerada resistiva [1], [2]. Os diodos são numerados na ordem das seqüências de condução e o ângulo de condução de cada diodo é  $120^\circ$  [3]. A cada  $60^\circ$ , quando qualquer tensão de linha da fonte atinge a mesma grandeza de tensão sobre o capacitor  $V_i$ , dois diodos irão entrar em condução e ocorrerá a transferência de energia da fonte para a carga.

Como exemplo de funcionamento do retificador, seja o intervalo em que  $V_{ab} = V_i$  [2]. São apresentadas três etapas de operação que são descritas a seguir:

**Primeira Etapa ( $t_0, t_1$ ):** A tensão de entrada iguala-se a tensão do capacitor C1. A tensão deste passa a ser imposta pela tensão de entrada, fazendo com que os diodos  $D_1$  e  $D_6$  entrem em condução. Esta etapa é mostrada na Figura 10.a.

**Segunda Etapa ( $t_1, t_2$ ):** Esta etapa se inicia quando a tensão de entrada atinge seu valor máximo. Os diodos continuam polarizados, mas a corrente no capacitor C1 se inverte e começa a se descarregar. A etapa é mostrada na Figura 10.b.

**Terceira Etapa ( $t_2, t_3$ ):** A tensão de entrada torna-se menor que a tensão sobre o capacitor C1, fazendo com que os diodos sejam polarizados reversamente. Logo a corrente de entrada se anula e a carga é alimentada pelo capacitor C1. Esta etapa é representada pelo circuito mostrado na Figura 10.c. As formas de onda das três etapas podem ser observadas na Figura 11.



c) Terceira Etapa

Figura 10 - Etapas de funcionamento do retificador trifásico.

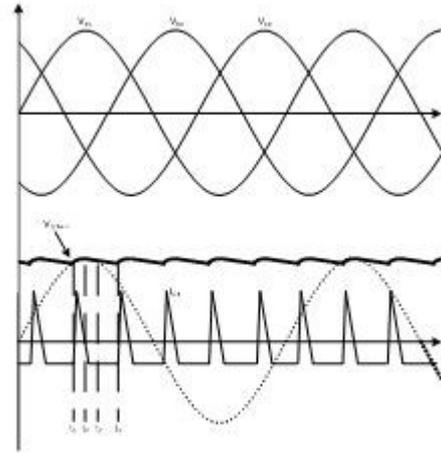


Figura 11 - Formas de onda teóricas para o retificador trifásico.

O interruptor  $S_1$  visto na Figura 9 é um dispositivo eletrônico controlado que opera no estado de condução (*on*) ou de bloqueio (*off*). Os períodos *on/off* são definidos pelo circuito de controle. O tempo de condução do interruptor é uma fração do período de chaveamento  $t_c = D \cdot T_{S1}$  onde  $D$  é chamado de ciclo de trabalho ou razão cíclica (*Duty Cycle*) [2].

Para entender o princípio de funcionamento do conversor *boost* são adotadas as seguintes considerações conforme proposto por [4]:

O conversor opera em regime permanente e em modo de condução contínua MCC.

Os semicondutores são ideais;

O indutor é ideal;

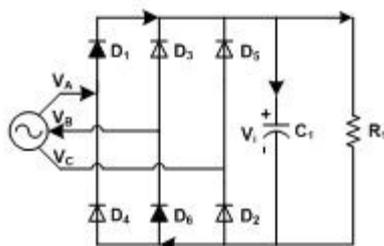
O capacitor de entrada é considerado como fonte de tensão constante;

A frequência de comutação dos interruptores é constante.

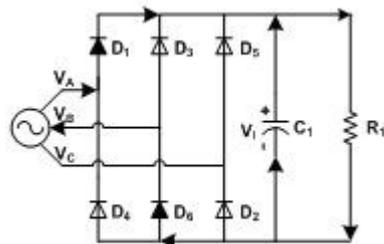
Como o conversor é estudado em MCC, este apresenta apenas duas etapas de operação num período de comutação que são descritas a seguir [6]:

**Primeira Etapa ( $t_0, t_1$ ):** O interruptor  $S_1$  está em condução e o diodo  $D_7$  está reversamente polarizado, assim isolando o estágio de saída. A fonte de entrada fornece energia ao indutor, e cuja corrente cresce de maneira linear. Esta etapa é mostrada na Figura 12.a.

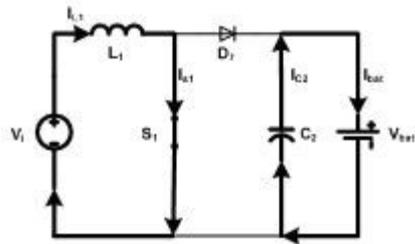
**Segunda Etapa ( $t_1, t_2$ ):** O interruptor  $S_1$  está bloqueado e o diodo  $D_7$  está diretamente polarizado. O estágio de saída recebe energia do indutor e da entrada. Esta etapa está mostrada na Figura 12.b. As formas de onda das três etapas podem ser observadas na Figura 13.



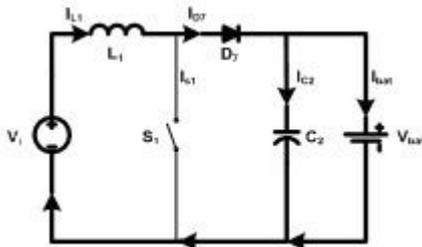
a) Primeira Etapa



b) Segunda Etapa



a) Primeira Etapa



b) Segunda Etapa

Figura 12. Etapas de operação do conversor boost.

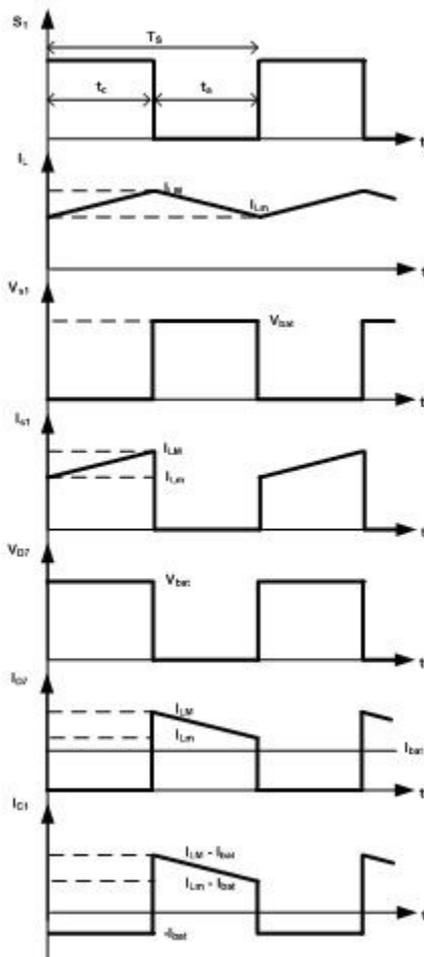


Figura 13. Formas de onda do conversor boost.

A expressão do ganho estático é representada graficamente na Figura 14. Interpretando a curva, para D igual a 0 a tensão de saída é igual a tensão de entrada, e quando D tende a 1 a tensão de saída tende a infinito.

$$G_e(D) = \frac{V_{bat}}{V_i} = \frac{1}{1-D} \quad (15)$$

O conversor *boost* ideal é capaz de produzir uma tensão de saída maior que a tensão de entrada. No entanto, a tensão de saída é limitado em um determinado valor quando o ciclo de trabalho, D, tende a 1 no conversor *boost* real, devido as não idealidades dos componentes do circuito [7].

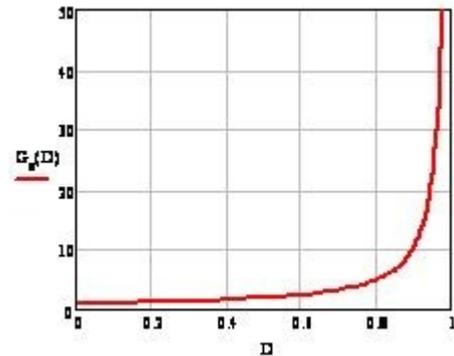


Figura 14 - Característica estática do conversor boost.

## VI. BATERIAS

No projeto os aspectos mais importantes, para escolha do tipo de bateria, são [39]:

- ✓ Baixo custo: custos altos comprometem a viabilidade do projeto;
- ✓ Vida útil: quando maior a vida útil menor os gastos com manutenção;
- ✓ Rendimento: a energia elétrica obtida por fontes renováveis é uma energia com custo considerável;
- ✓ Disponibilidade: evitar importações e custos com grandes estoques.

Para este tipo de aplicação da bateria de chumbo ácido é a melhor alternativa pelos motivos explicados a seguir. Entre as baterias chumbo ácido, existem baterias automotivas, tracionárias e estacionárias. Para aplicação em sistemas autônomos de energia elétrica a bateria mais recomendada é a bateria estacionária. As baterias estacionárias são um meio termo entre as baterias automotivas e tracionárias que apresentam uma baixa manutenção durante sua vida útil [36].

Enquanto as baterias chumbo ácido reguladas a válvula VRLA necessitam de um ambiente controlado (25°C), as baterias da linha Moura CLEAN incorporaram inovações tecnológicas que dispensam essa exigência, além de proporcionar um excelente desempenho, torna a bateria ideal para regiões de clima tropical. A tecnologia SPV, presente na Moura CLEAN, é responsável pela baixa emissão de vapores ácidos, estabelecendo uma nova categoria na evolução tecnológica das baterias estacionárias de chumbo-ácido [36].

Na aplicação do sistema proposto são usadas 4 (quatro) baterias de 12V e 150Ah. As baterias são conectadas em série totalizando um barramento de 48V. A capacidade das baterias foi definida de acordo a autonomia indicada na Tabela I.

## VII. INVERSOR

O diagrama de blocos indicado como “Inversor” na Figura 2 é dividido em dois blocos como mostra a Figura 15, onde no primeiro bloco encontra-se um conversor *boost* de alto ganho de tensão, e no segundo bloco encontra-se o inversor de tensão (*Voltage Source Inverter-VSI*). Os conversores de ambos os blocos são mostrados na Figura 16, e os mesmos terão as funções de, elevar a tensão do banco de baterias de 48V até a tensão contínua de 400V, e logo transformar a tensão contínua de 400V em tensão alternada senoidal com valor eficaz de 220V e frequência de 60Hz.

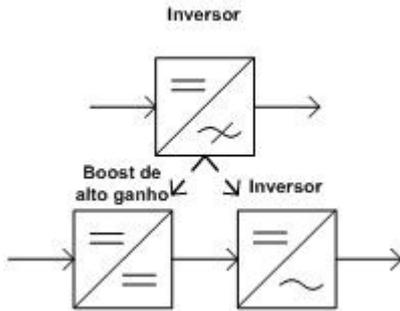


Figura 15. Diagrama de blocos do inversor.

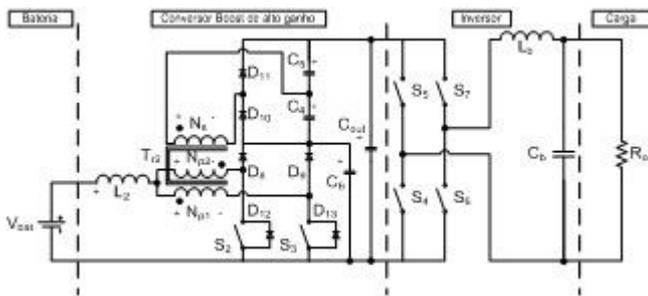


Figura 16. Conversor boost de alto ganho em série com um inversor.

A topologia do conversor *boost* de alto ganho tem a característica de trabalhar com baixos valores de tensão de entrada contínua (12V a 48V) e uma alta tensão de saída contínua (300V a 400V). Esta configuração opera como um conversor elevador já que a tensão de saída é maior que a tensão de entrada e depende dos sinais de comando dos interruptores para seu correto funcionamento. Naturalmente, os interruptores trabalham com ciclo de trabalho ou razão cíclica  $D$  maior que 0,5 [3], [15] e [16].

Num período de operação no modo de condução contínua MCC, o conversor *boost* apresenta quatro etapas de operação, sendo a terceira etapa e a quarta etapa similares as duas primeiras etapas, que são descritas a seguir:

**Primeira Etapa ( $t_0, t_1$ ):** Os interruptores  $S_2$  e  $S_3$  estão em condução. A energia é armazenada somente no indutor  $L_2$  e não é transferida a carga. Esta etapa é mostrada na Figura 17.a, e a mesma finaliza quando o interruptor  $S_2$  é bloqueado.

**Segunda Etapa ( $t_1, t_2$ ):** Nesta etapa o interruptor  $S_3$  permanece em condução. A tensão sobre o interruptor  $S_2$  é igual a tensão sobre o capacitor  $C_6$ . Os diodos  $D_8$  e  $D_{10}$  são diretamente polarizados. A energia armazenada no indutor na primeira etapa assim como a energia da fonte de entrada é transferida aos capacitores filtro  $C_6$  e  $C_4$ . A etapa é mostrada na Figura 17.b.

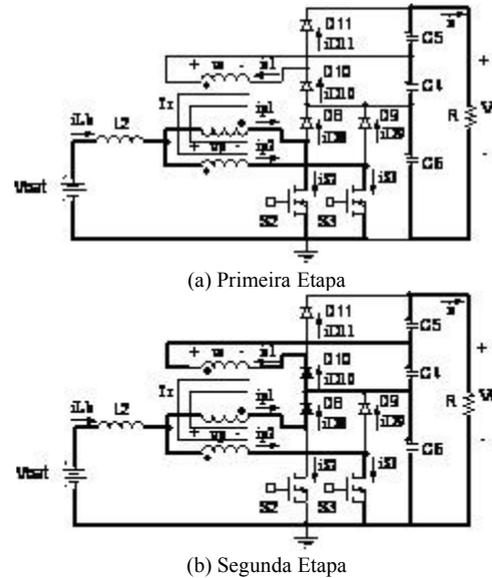


Figura 17 - Etapas de operação do boost de alto ganho.

A característica estática do conversor define o ganho de tensão do conversor, ou seja, relaciona a tensão de saída com a tensão de entrada.

Para determinar o ganho estático, a relação de transformação é definida como sendo a relação entre o número de espiras do enrolamento secundário e o número de espiras do enrolamento primário dada por (16) e (17).

$$N_{p1} = N_{p2} = N_{pboost} \quad (16)$$

$$\frac{N_s}{N_{pboost}} = a \quad (17)$$

Onde:

$N_{p1}$  → Número de espiras do enrolamento primário do transformador  $T_{r2}$ ;

$N_{p2}$  → Número de espiras do enrolamento primário do transformador  $T_{r2}$ ;

$N_{pboost}$  → Número de espiras dos enrolamentos primários do transformador;

$N_s$  → Número de espiras do enrolamento secundário do transformador;

$a$  → Relação de transformação entre os enrolamentos secundário e primário.

O ganho estático do conversor *boost* de alto ganho é determinado a partir da tensão média sobre o indutor de armazenamento  $L_2$  que é representada por (18).

$$\frac{V_s}{V_{bat}} = \frac{1+a}{1-D_{boost}} \quad (18)$$

Onde  $V_s$  representa a tensão de saída e  $V_{bat}$  a tensão de entrada (tensão sobre as baterias).

O ganho estático ideal como função da variação do ciclo de trabalho, tomando como parâmetro a relação de transformação, é mostrado na Figura 18. A curva descreve o comportamento da tensão de saída com a variação da razão cíclica, além de expor os pontos de operação na qual o conversor opera, dependendo da variação da tensão na entrada. Este gráfico é fundamental, pois ele descreve qual será a relação de transformação “ $a$ ” que será utilizada no projeto.

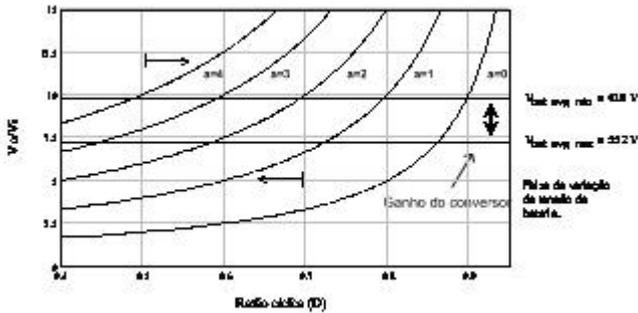


Figura 18 – Ganho estático ideal do conversor *boost* de alto ganho.

O inversor de tensão (*Voltage Source Inverter –VSI*) também conhecido de conversor CC/CA de tensão, realiza a transformação da tensão contínua em tensão alternada com uma determinada frequência e amplitude. A topologia apresenta a configuração ponte completa como mostra a Figura 16. Foi escolhida esta configuração devido a tensão eficaz de saída de 220V CA que apresenta uma tensão de pico de aproximadamente 311V. Portanto, usando esta configuração, os níveis de tensão sobre os interruptores serão aproximadamente iguais a tensão de entrada do inversor.

A modulação usada para controlar a tensão de saída é a modulação por largura de pulso senoidal (*Sinusoidal Pulse Width Modulation - SPWM*). Na literatura existem vários tipos de modulação SPWM. A modulação adotada é do tipo PWM com comutação de tensão unipolar. Esta modulação permite que o filtro de LC de saída opere com o dobro da frequência de comutação, assim, o peso e o volume do filtro é reduzido consideravelmente [1], [32] e [33].

A modulação por largura de pulso unipolar pode ser gerada de duas maneiras, sendo uma delas comparando uma onda portadora triangular com duas moduladoras senoidais defasadas em 180°; e a outra comparando duas ondas portadoras triangulares com uma onda moduladora senoidal como mostra a Figura 19 [1], [32] e [33].

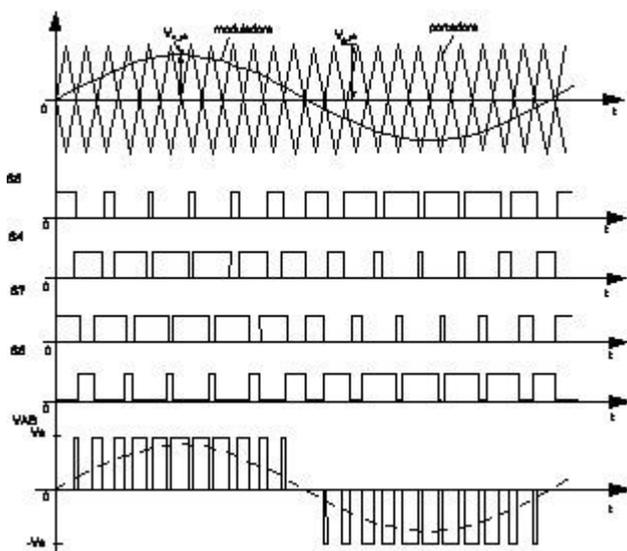


Figura 19 - Modulação por largura de pulso senoidal SPWM unipolar.

### VIII. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta versão do artigo são apresentados os resultados de simulação do inversor. Na versão final serão apresentados

os resultados experimentais de todos os estágios do sistema sob estudo.

As especificações do inversor são apresentadas a seguir:

Tabela II. Especificações do inversor

Parâmetro	Valor
Tensão média na bateria	$V_{bat\_avg} = 48V$
Potência aparente máxima	$S_{o\_avg} = 720VA$
Tensão eficaz	$V_{o\_rms} = 220V$
Fator de potência admissível	$f_{po} = 0,7$
THDv máximo	$THD_{Vo} = 5\%$
Frequência da tensão de saída.	$f_{o\_avg} = 60Hz$

As simulações foram realizadas para as tensões do banco de baterias de  $V_{bat}=40,8V$ ,  $V_{bat}=48V$  e  $V_{bat}=55V$ . Cujos resultados são apresentados a continuação.

Para cada tipo de simulação, foram apresentadas quatro características de carga:

- ✓ Operação sem carga;
- ✓ Operação com carga resistiva na potência nominal do inversor;
- ✓ Operação com carga indutiva, na potência nominal do inversor;
- ✓ Operação com carga não linear, na potência nominal do inversor.

Para a carga não linear optou-se por utilizar um circuito composto por uma ponte retificadora de diodos, um capacitor e uma carga resistiva, com um fator de crista de 3. Este teste tem o intuito de verificar o afundamento de tensão e o comportamento das malhas de controle de cada conversor. O circuito utilizado para simular todos os tipos de carga é mostrado na Figura 20.

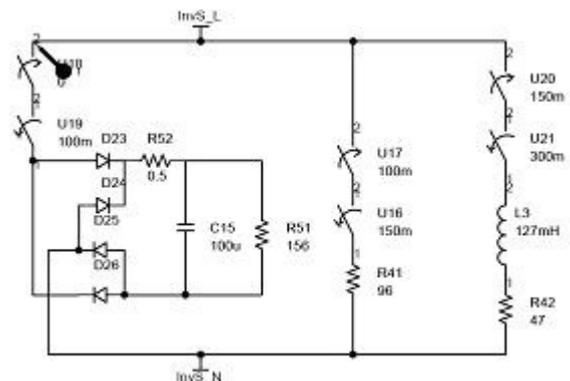


Figura 20. Circuito proposto para simular a carga não linear, a carga linear resistiva e a indutiva.

#### A. Resultado com Tensão da Bateria de $V_{bat}=40,8V$

A Figura 21 mostra as formas de onda para os três tipos de carga.

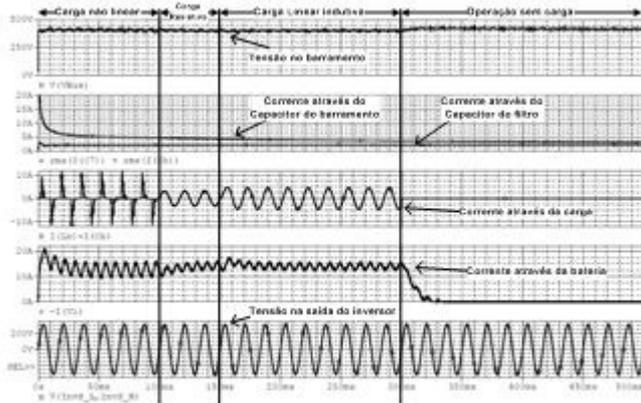


Figura 21. Resultado de simulação para operação com as cargas indicadas e tensão na bateria de 40,8V.

A Figura 22 mostra o detalhe da tensão de barramento, corrente de saída do inversor, corrente através da bateria e tensão de saída do inversor, todas elas para uma carga não linear.

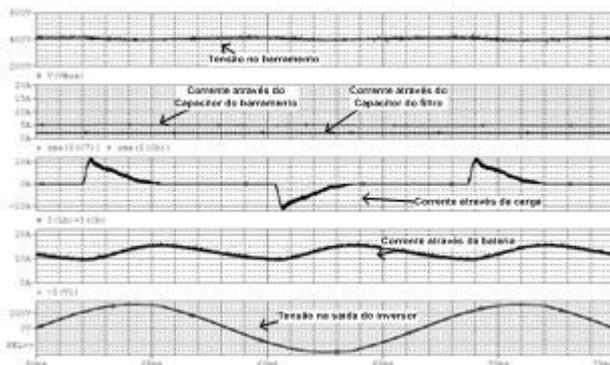


Figura 22. Formas de onda para carga não linear.

A Figura 23 mostra o espectro harmônico da tensão de saída do inversor. Como mostra a análise, a taxa de distorção harmônica é menor que 0,9%.

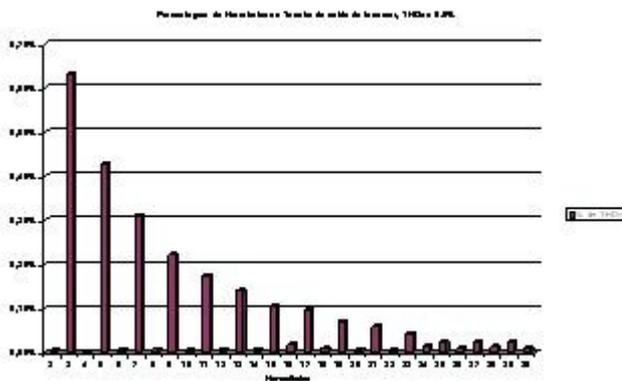


Figura 23. Espectro harmônico da tensão de saída do inversor.

**B. Resultado com Tensão da Bateria de  $V_{bat}=48V$**

A Figura 24 mostra as formas de onda para os três tipos de carga.

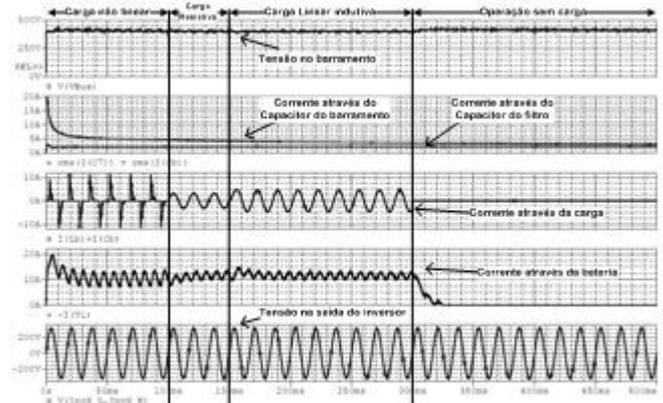


Figura 24. Resultado de simulação para operação com as cargas indicadas e tensão na bateria de 48V.

A Figura 25 mostra o detalhe da tensão de barramento, corrente de saída do inversor, corrente através da bateria e tensão de saída do inversor, todas elas para uma carga não linear.

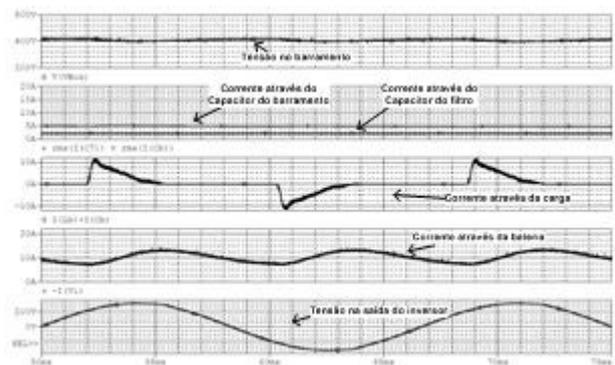


Figura 25. Formas de onda para carga não linear.

A Figura 26 mostra o espectro harmônico da tensão de saída do inversor. Como mostra a análise, a taxa de distorção harmônica é menor que 0,92%.

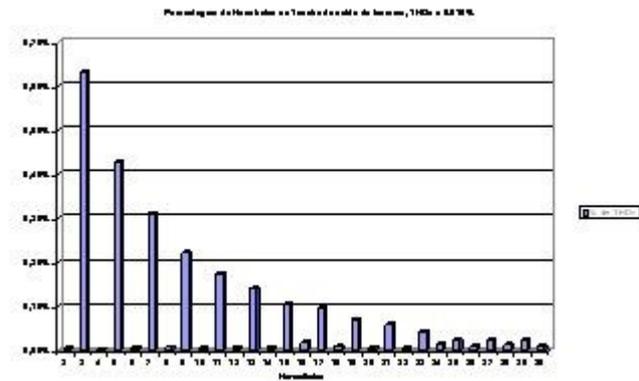


Figura 26. Espectro harmônico da tensão de saída do inversor.

**C. Resultado com Tensão da Bateria de  $V_{bat}=55V$**

A Figura 27 mostra as formas de onda para os três tipos de carga.

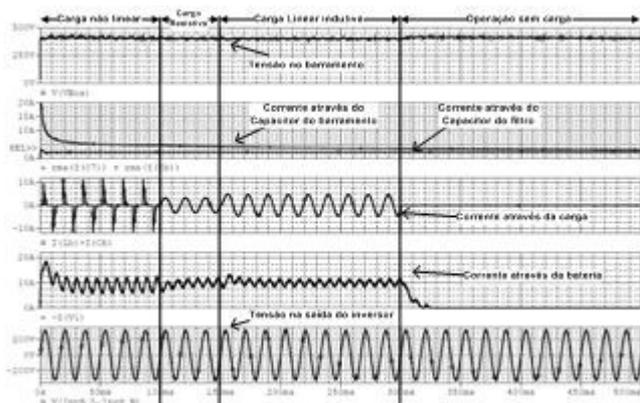


Figura 27. Resultado de simulação para operação com as cargas indicadas e tensão na bateria de 55V.

A Figura 28 mostra o detalhe da tensão de barramento, corrente de saída do inversor, corrente através da bateria e tensão de saída do inversor, todas elas para uma carga não linear.

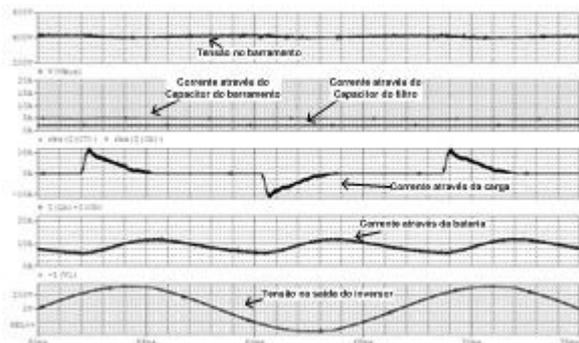


Figura 28. Formas de onda para carga não linear.

A Figura 29 mostra o espectro harmônico da tensão de saída do inversor. Como mostra a análise, a taxa de distorção harmônica é menor que 0,95%.

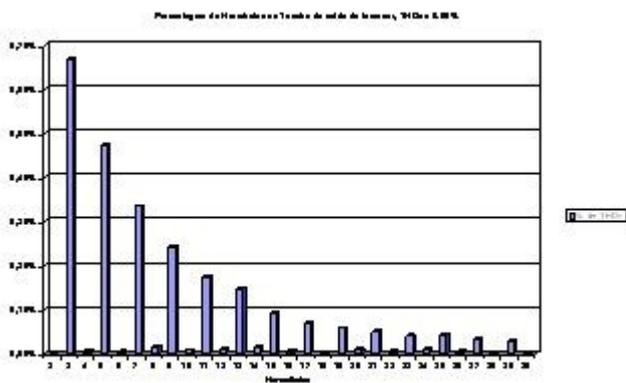


Figura 29. Espectro harmônico da tensão de saída do inversor.

As simulações realizadas apresentam resultados esperados para a operação com os três valores de tensão nas baterias, onde a ondulação de corrente através das baterias tem uma baixa ondulação "ripple" de baixa frequência. Assim, as perdas de condução devido a resistências internas são reduzidas e como consequência a temperatura interna é reduzida. A tensão de saída do inversor está com um índice de distorção harmônica abaixo dos valores recomendados (THDv < 5%)

## IX. CONCLUSÕES

No artigo é proposto um sistema autônomo de energia elétrica usando uma turbina eólica do tipo múltiplas. Após uma revisão bibliográfica foi constatado que as turbinas do tipo múltiplas são usadas principalmente em sistemas de bombeamento de água para consumo humano e animal. Na atualidade existe pouca literatura em aplicações de geração de energia elétrica. Já que o Brasil apresenta uma vasta costa no oceano Atlântico onde se concentra as correntes de ar, se teve a iniciativa de pesquisar o potencial das turbinas citadas na geração de energia elétrica. A tecnologia das turbinas múltiplas é bastante difundida entre os artesãos que se dedicam a fabricar este tipo equipamentos. Estudos preliminares mostram que uma turbina de 3m de diâmetro com uma velocidade de vento de 5m/s é capaz de gerar uma potência de 80W. Tais resultados serão confirmados experimentalmente na versão final deste artigo.

O sistema proposto, além da turbina, apresenta um gerador síncrono de imã permanente, que apresenta uma relação custo benefício adequadas as necessidades do projeto e de fácil aquisição.

Outro componente é o controlador de carga baseado num retificador trifásico ponte de Graetz e um conversor *boost* convencional que permite a operação no ponto de máxima potência do conjunto turbina-gerador.

Os acumuladores de energia mais adequados são as baterias do tipo estacionarias de chumbo-ácido.

Para elevar a tensão das baterias até um determinado valor de tensão foi adotado o conversor *boost* de alto ganho, e um inversor na configuração ponte completa com o objetivo de transformar a tensão contínua em tensão alternada segundo as especificações.

## X. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF por proporcionar os recursos financeiros da pesquisa, a Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP por ter possibilitado recursos através de outros projetos para a compra de instrumentos de medição e fontes de alimentação, ao Grupo de Processamento de Energia e Controle-GPEC por facilitar o uso do laboratório de eletrônica de potência.

## XI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. C. Martins, I. Barbi. "Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA". Florianópolis, Editora do Autor, Maio de 2005.
- [2] M. H. Rashid. "Power Electronics Handbook". Academic Press 2001, California.
- [3] I. Barbi. "Projetos de Fontes Chaveadas". 2ª ed. Florianópolis, Editora do Autor, 2007.
- [4] D. C. Martins, I. Barbi. "Conversores CC-CC Básicos Não Isolados". 2ª ed. Florianópolis, Editora do Autor, 2006.
- [5] Luiz Fernando P. de Melo. "Análise e projeto de fontes chaveadas". 1ª Ed., São Paulo, Editora Erica Ltda, 1996.
- [6] Johansson, Bengt. "Improved models for DC-DC converters". *Licentiate Thesis, Lund University press, Lund 2003*.
- [7] Erickson, Robert W., Maksimovic, Dragan. "Fundamentals of Power Electronics". *Second Edition, Kluwer Academic Publishers, New York, 2000*.
- [8] Kislovski, André S., Redl, Richard, Sokal, Nathan O.. "Dynamic Analysis of Switching –Mode DC/DC Converters". *Van Nostrand Reinhold, New York, 1991*.

- [9] McLyman, Colonel W. T. "Transformer and inductor design handbook". *New York. Marcel Dekker, 1988.*
- [10] Torrico-Bascopé, R. P., Perin, A. J. "O Transistor IGBT aplicado em eletrônica de potência". *Porto Alegre. Sagra Luzzato, 1997.*
- [11] Banco Mundial, "Wind Pumping- A Handbook".
- [12] Tony Burton, Davi Sharpe. "Wind Energy Handbook". *Ed. Wiley. England, 2001.*
- [13] Carlos, Juan Cádiz Deleito. "La Energia Eolica (Tecnologia e historia)". *Ed. Herman Blume. 1984.*
- [14] Fox, Robert W. McDonald, Alan T. Pritchard, Philip J. "Introdução à Mecânica dos Fluidos". *LTC. Rio de Janeiro, 2004.*
- [15] R. P. Torrico-Bascopé, G. V. Torrico-Bascopé, R. D. Moura, C. G. C. Branco, L. D. Bezerra, D. de S. Oliveira Jr.. "High Frequency isolation UPS System for low power applications". *In Proc. of APEC 2008 – IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, pp 1296-1302, 2008.
- [16] G. V. Torrico-Bascopé, R. P. Torrico-Bascopé, D. S. de Oliveira Jr., S. A. Vasconcelos, F. L. M. Antunes, C. G. C. Branco, "A high step-up dc-dc converter based on three-state switching cell". *In Proc. of ISIE 2008 – IEEE Internacional Symposium on Industrial Electronics*, pp 998-1003, 2008.
- [17] Middlebrook, R.D., Cuk, Slobodan, "A General unified approach to modeling switching-converter power stages". *In Proceedings of the IEEE Power electronics Specialists Conference, June 8 – 10, 1976, Cleveland, OH.*
- [18] Tomohiko Nakamura, Shigeo Morimoto, Masayuki Sanada, Yoji Takeda. "Optimum Control of IPMSG for Wind Generation System", *IEEE – PPC - Osaka*, pp.1435-1440, 2002.
- [19] Shigeo Morimoto, Hideaki Nakayama, Masayuki Sanada, Yoji Takeda. "Sensorless Output Maximization Control for Variable-Speed Wind Generation System Using IPMSG", *IEEE*, pp.1464-1471, 2003.
- [20] I. R. Machado, D. S. Oliveira Jr., L. H. C. Barreto, T. A. Bernardes, "Avaliação do Aproveitamento da Energia Elétrica Gerada por Um Sistema Eólica para Carregamento de Baterias.", *Simpósio Brasileiro de Sistemas de Energia Elétrica, Campina Grande, 2006.*
- [21] S. Yuvarajan, Hwa-Liang Chiou. "A novel sine PWM scheme using waveform generators". *In IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 41, No. 3, June 1994.
- [22] R. M. Green, J. T. Boys. "Implementation of pulsewidth modulated inverter modulation Strategies". *In IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-18, No. 2, March/April 1982.
- [23] Madhu Mangal, G. De. "Novel control strategy for sinusoidal PWM inverters". *In IEEE Transactions on industry applications*, Vol. IA-23, No. 3, May/June 1987.
- [24] Vorpérian, Vatché. "Simplified Analysis of PWM converters using model of PWM Switch – Part I: Continuous Conduction Mode". *In IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, Vol. 26, No 3, May 1990.
- [25] Vorpérian, Vatché. "Simplified Analysis of PWM converters using model of PWM Switch – Part II: Discontinuous Conduction Mode". *In IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, Vol. 26, No 3, May 1990.
- [26] Kim, J.; Choi, J.; Hong, H.. "Output LC filter design of voltage source inverters considering the performance of controller". *In POWERCON'2000 – Power System Technology Proceedings*, v.3, p. 1659-1664, 2000.
- [27] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis. "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, N° 2, April 2006.
- [28] Andreas Lohner, Eckhard Karden, Rik W. De Doncker, "Charge Equalizing and Lifetime Increasing with a New Charging Method for VRLA Batteries", *Proc. IEEE Int'l. Telecommunications Energy Conf.*, 1997, pp.407-411.
- [29] Chalmers, B.J. Green, A.M. Reece, A.B.J. Al-Badi, A.H., "Modelling and simulation of the Torus generator", *Electric Power Applications*, *IEEE Proceedings*, Nov. 1997, Vol. 144, Issue: 6, pp. 446 – 452.
- [30] Jean-Luc Menet. Laurent-Charles Valdès. Bruno Ménart, "A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- $\sigma$  criterion", *Renewable Energy* 22 (2001) pp. 491-506.
- [31] M.A. Khan, P. Pillay. K. D. Visser, "On Adapting a Small PM Wind Generator for a Multiblade, High Solidty Wind Turbine", *Electric Power Applications*, *IEEE Transactions on Energy Conversion* Vol. 20, N° 3, September 2005.
- [32] L. M. Menezes. "Projeto INVERSOL – Desenvolvimento de uma fonte ininterrupta de energia com possibilidade de uso em sistema fotovoltaico". *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Ceará, Julho de 2007.
- [33] Haeming, Fernando. "Metodologia de Projeto de Inversores monofásicos de tensão para cargas não-lineares". *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Santa Catarina, Julho de 2005.
- [34] Souza, Kleber C. A.. "Conversor CC-CA monofásico para interligar painéis fotovoltaicos ao sistema elétrico". *Fortaleza, 2003. Dissertação (Mestrado em Eng. Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.*
- [35] I. R. Machado, "Sistema Eólico para Carregamento de Bateria", Março de 2007. *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará.
- [36] E. M. Sá Jr., "Sistema Fotovoltaico para Iluminação Pública em Horário de Ponta", Novembro de 2004. *Dissertação de Mestrado*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará.
- [37] Romero, Manuel R. R.. "Sistema ininterrupto de energia monofásico tipo off-line". Publicação interna, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- [38] Oliveira, S.V.G; Barbi, Ivo; Romaneli, E.F.R. "Metodologia de projetos de inversores monofásicos PWM senoidais alimentando cargas não lineares". *Em SEP'2002 – Seminário de Eletrônica de potência do INEP. Florianópolis*, p131-136, 2002.
- [39] Norma técnica IEEE Std 1184-2006. "IEEE Guide for batteries for Uninterruptible Power Supply Systems". IEEE, New York, NY, Setembro de 2006.
- [40] Resolução normativa No 83, Agência Nacional de Energia Elétrica, (ANEEL). Brasília, Setembro de 2004.