



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

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

GRUPO - II

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

**PROPOSTA DE CONVERSOR PARA RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA
DE OPERAÇÃO DE PEQUENOS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Diogo Cesar Coelho
ELETROSUL**

RESUMO

Em um pequeno sistema de geração elétrica (menor que 5kW), este conversor atua de forma a extrair a potência elétrica máxima que tal sistema pode fornecer, dependendo de seu ponto de operação. No caso de um aproveitamento hidráulico, em uma configuração tipo roda d'água, este conversor atua de forma a aproveitar a máxima energia que a queda e vazão da água podem fornecer em determinado instante. A mesma aplicação pode ser dada para uma fonte que utiliza células fotovoltaicas, aproveitando a máxima potência possível de uma determinada incidência solar, ou para uma fonte eólica, aproveitando ao máximo o vento momentâneo.

PALAVRAS-CHAVE

Conversor, MPPT, Gerador, Rastreamento, Boost.

1.0 - INTRODUÇÃO

A técnica para rastrear o ponto de máxima potência (MPPT, sigla em inglês para Rastreamento do Ponto de Máxima Potência) de um sistema de geração elétrica em qualquer situação de operação, utilizada nesta pesquisa, está baseada na técnica da observação do comportamento do sistema de geração, logo após uma perturbação. Além disso, o controle deve ser ajustado para que o conversor possa ser utilizado para vários tipos de sistema de geração elétrica, seja ele hidráulico, eólico, solar, térmico, etc, pois suas dinâmicas não são as mesmas.

A escolha de um conversor tipo Boost para este trabalho é baseada em sua simplicidade e forma com que se adequa a esta aplicação. Por exemplo: quando utilizado com máquinas girantes, a indutância interna destas é aproveitada como indutância de entrada do conversor, diminuindo consideravelmente seu peso e volume; a característica de fonte de tensão em sua saída é ideal para utilização de um inversor para acoplamento à rede elétrica; a facilidade de controle por possuir apenas um interruptor com a mesma referência entre entrada e saída.

Na aplicação proposta por este informe, havendo a possibilidade de utilizar uma máquina girante, é recomendado que seja utilizado um gerador síncrono trifásico, com fluxo axial e ímã permanente (AFPM – Sigla em inglês para *Axial Flux Permanent Magnet*). Este possui várias vantagens, comparadas com as outras máquinas de mercado, quando o objetivo é gerar pequenas quantidades de energia elétrica, sendo as principais: possui uma alta relação potência/peso; não necessita de regulador de tensão e velocidade para geração em velocidade variável; simplicidade na forma de refrigeração; facilidade de acomodação de vários pólos para geração em baixa rotação.

A configuração a ser analisada inicialmente, e que é foco deste informe, será uma fonte CC para entrada do conversor, o conversor Boost propriamente dito com seu controle MPPT e uma bateria em sua saída. Em seguida serão adicionados elementos que estarão presentes num funcionamento real do conversor, como fonte alternada

(com tensão e frequência variáveis) trifásica retificada na entrada do conversor e banco capacitivo com inversor na saída do mesmo.

Em setembro de 2010 a ANEEL emitiu uma Nota Técnica (nº 0043/2010-SRD/ANEEL) onde é apresentada uma visão geral sobre a instalação de geração distribuída de pequeno porte, a partir de fontes renováveis, conectada em tensão de distribuição, com o objetivo de iniciar uma consulta pública para o recebimento de contribuição sobre o tema. Esta nota motivou ainda mais a elaboração desta pesquisa, que se mostrou muito apropriada para o momento de criação desta legislação específica.

2.0 - PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA

A proposta deste trabalho é apresentar uma técnica que minimize custo, peso, volume e complicados algoritmos de controle para se obter o resultado esperado. E para exemplificar esta técnica é proposto o seguinte panorama: uma micro central hidrelétrica, que não possua nenhum reservatório, ou seja, toda a água que chega tem que ser utilizada e que tenha recursos escassos para sua construção. Como solução, utiliza-se um gerador AFPM, para que não haja necessidade de sistema de excitação e assim, pode-se trabalhar em velocidade variável utilizando toda a quantidade de água disponível para mover a turbina.

O rastreamento da máxima potência se dá de uma forma relativamente simples. É injetada uma pequena perturbação no controle deste sistema e então, com o algoritmo apresentado adiante, verifica-se o comportamento da potência processada.

3.0 - MODELAGEM

3.1 Visão Geral

A Figura 1 apresenta o diagrama de blocos do algoritmo que é implementado para o rastreamento da máxima potência e a numeração para descrição dos blocos é apresentada a seguir:

- (1) Utiliza-se como entrada para este sistema de controle um sinal medido que representa a tensão de entrada (V_{inmed}) e outro sinal, também medido, que representa a corrente de entrada (I_{inmed}). O multiplicador, (1), faz o cálculo de um sinal que representa a potência de entrada (P_{inmed}).
- (2) A potência calculada é amostrada em uma frequência idêntica e em fase com uma perturbação cíclica, inserida no conversor. Na memória do amostrador S/H_{hi} fica o valor amostrado no instante em que a perturbação é positiva e na memória do amostrador S/H_{low} fica o valor amostrado no instante em que a perturbação é negativa.
- (3) Calcula-se, constantemente, a diferença entre os valores nas memórias dos amostradores. Esse valor varia entre positivo, negativo ou nulo. O objetivo é que ele permaneça grande parte do tempo nulo, pois assim, como é explicado mais a diante, o sistema deve estar operando no ponto de máxima potência.
- (4) O integrador atua sobre os sinais que chegam até ele da seguinte maneira: se for um valor positivo, produz uma rampa crescente, se o valor de entrada for negativo, produz uma rampa decrescente, se o valor for nulo, produz uma reta sem inclinação. Este é o sinal usado como referência para a variável de controle do conversor. A constante de tempo deste integrador deve estar adequada à frequência de perturbação, para que a saturação do sinal na sua saída não ocorra em seu funcionamento normal.
- (5) É inserida no sinal de saída do integrador uma onda quadrada que deve servir de perturbação na referência de controle e assim o ciclo se reinicia.

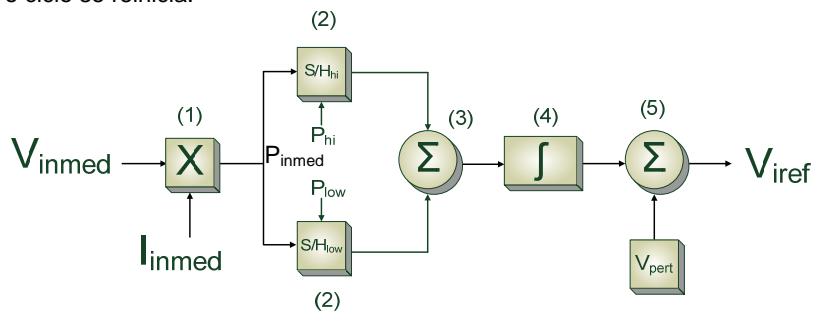


Figura 1 – Diagrama de blocos do algoritmo de rastreamento da máxima potência.

A variável de controle escolhida para a aplicação do MPPT é a razão cíclica, fazendo a potência processada pelo conversor tender para um ponto ótimo. A definição de razão cíclica é apresentada na expressão (1),

$$D = \frac{t_b}{T_s} \quad (1)$$

onde T_s é o período total do ciclo de chaveamento do interruptor e t_b é o período onde o interruptor permanece conduzindo.

Pelo fato de ser necessário observar o quanto varia a potência de entrada perante uma perturbação, somou-se à a referência da razão cíclica uma onda quadrada, a qual produz uma alteração considerável na potência quando a mesma está fora do ponto de máximo. A onda quadrada foi escolhida por ser uma forma simples de aplicar pequenos degraus e observar a resposta do sistema.

A Figura 2 apresenta uma das curvas de potência de entrada, em função da razão cíclica para uma dada tensão de entrada. É possível para o sistema operar em duas regiões, A ou B. Tomando um ponto de operação do sistema, onde a razão cíclica do boost é D_1 , e aplicando um degrau positivo, fazendo com que a razão cíclica passe para D_2 , a potência deve ir de P_1 para P_2 . Se for aplicado um degrau negativo na razão cíclica e ela se alterar de D_1 para D_3 , a potência deve ir de P_1 para P_3 . Sempre que o sistema estiver operando na região A, a expressão (2) é válida, ou seja, se for feita a subtração de P_2 por P_3 , o resultado é sempre positivo. Com o mesmo raciocínio, agora na região B, a expressão (3) torna-se válida e a subtração de P_2 por P_3 resulta sempre em um valor negativo.

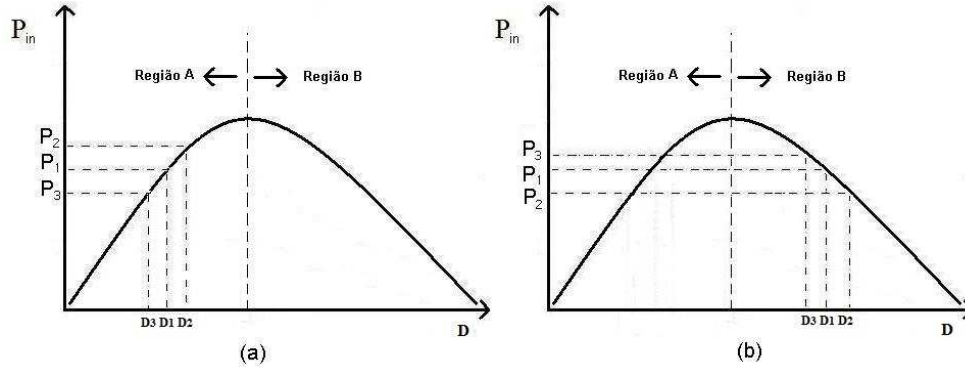


Figura 2 – Curva da potência de entrada em função da razão cíclica.

$$\text{Região A: } P_2 \geq P_3 \quad (2)$$

$$\text{Região B: } P_3 \geq P_2 \quad (3)$$

A técnica aqui utilizada é fazer com que a razão cíclica siga a referência apresentada na expressão (4). Para cada instante de perturbação um novo valor de $(P_2 - P_3)$ é calculado e a referência de controle da razão cíclica é alterada,

$$V_{\text{int}}(t) = K \int (P_2 - P_3) dt + V_{\text{int}}(t-1) \quad (4)$$

onde $V_{\text{int}}(t-1)$ é a referência antes de P_2 ou P_3 terem seus valores atualizados. O valor de K indica a velocidade de crescimento ou decrescimento do sinal integrado. O valor de K deve ser escolhido de acordo com a frequência de perturbação e esta, definida de acordo com a dinâmica de resposta do sistema de geração, ou seja, quanto mais lento é o sistema, menor deve ser a frequência de perturbação e menor o K . Se o sistema responde de forma rápida, a frequência aumenta e o K deve ser maior. Assim, o sistema tende a aumentar a razão cíclica se estiver operando na região A e tende a diminuir esta variável se estiver operando na região B. Quando estiver operando no ponto de máxima potência, a diferença entre P_2 e P_3 deve ser tão próxima a zero que a sinal de controle para a razão cíclica praticamente não deve ser alterada, permanecendo assim no ponto de máxima potência extraída do gerador.

A seguir é dada uma explicação do funcionamento e objetivo de cada bloco do diagrama apresentado anteriormente na Figura 1.

3.2 Inserção da Perturbação na Referência de Razão Cíclica

A razão cíclica do conversor é controlada através de uma referência, calculada somando o sinal de saída do integrador, que pode ser crescente, decrescente ou simplesmente constante, com uma onda quadrada. A Figura 3(A) apresenta um exemplo de razão cíclica de referência crescente, obtida na saída do integrador. A perturbação, Figura 3(B), é inserida nesta referência e tem a forma de uma onda quadrada. A soma destes dois sinais é apresentada na Figura 3(C), ou seja, a razão cíclica D deve seguir essa referência.

Observando a razão cíclica em ascensão, sem perturbação, na Figura 4(a), nota-se que a potência tem apenas um ponto de máximo. Interessante ressaltar que, um degrau positivo na razão cíclica, quando esta se encontra na região B, Figura 4(b), causa um degrau negativo na potência. Isto se deve ao fato de que ao operar na região B a máquina é freada e a tensão nos terminais da máquina passa a diminuir consideravelmente, por isso uma tentativa de aumento de potência pelo conversor causa um decremento de potência na região B. Já na região A, a mesma tentativa causa um incremento na potência, pois há folga para extrair mais potência do gerador e tensão nos terminais da máquina não diminui consideravelmente.

3.3 Multiplicador

O multiplicador faz uma multiplicação algébrica de suas variáveis de entrada. Como exemplo, a Figura 5 mostra essa operação. Nota-se que enquanto V_{inmed} e I_{inmed} possuem valor igual a 10 e 5 respectivamente, a multiplicação, ou seja, P_{inmed} possui valor igual a 50. Quando a corrente sofre uma perturbação em t_p e passa a ter valor igual a 4, a potência tem seu valor alterado para 40.

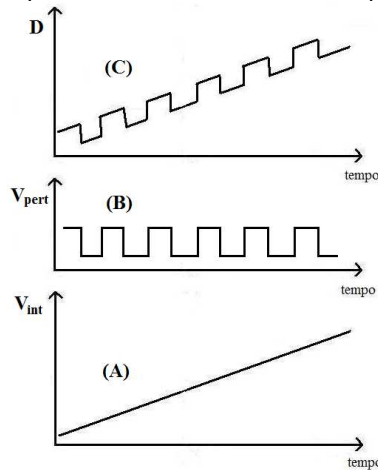


Figura 3 – Inserção da perturbação na referência da razão cíclica.

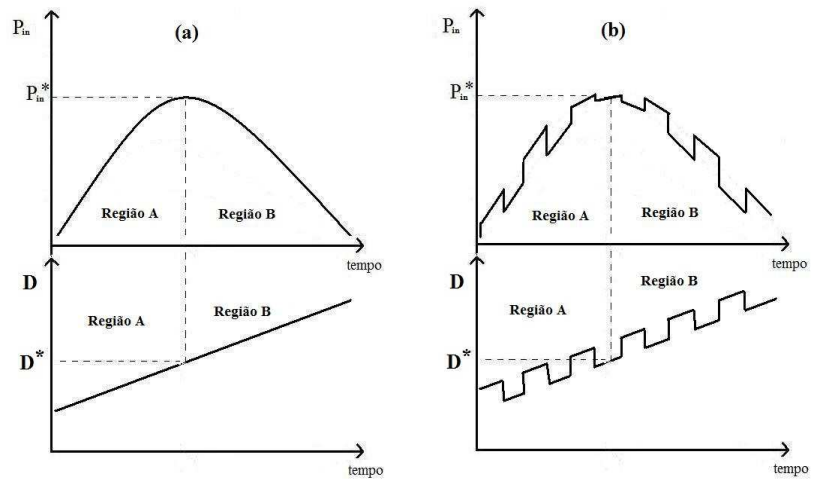


Figura 4 – Comparação dos pontos de máxima potência com e sem perturbação.

3.4 Amostradores e Sustentadores – Sample and Hold's

Para a função de amostrar e sustentar o sinal obtido na saída do multiplicador são usados *Sample and Hold's*, ou de modo abreviado S/H's. São usados dois: um para fazer a amostra e sustentação do sinal durante o degrau positivo da perturbação e outro deve atuar durante o degrau negativo da perturbação. A Figura 7 apresenta o funcionamento dos S/H's.

Após a razão cíclica sofrer um degrau positivo, a potência de entrada calculada também sofre uma variação. Neste trabalho a amostragem da potência ocorre logo antes de um novo degrau na razão cíclica. Assim o "S/H_{hi}" amostra e sustenta a potência ao final do degrau positivo da razão cíclica e o "S/H_{low}" amostra e sustenta a potência ao final do degrau negativo da razão cíclica. O sincronismo dos amostradores é feito através do gerador de perturbação. Ao final de cada degrau positivo um pulso é enviado para o "S/H_{hi}" fazer a amostragem e ao final de cada degrau negativo um pulso é enviado para o "S/H_{low}".

3.5 Comparador dos S/H's

Este comparador tem a função de determinar se a referência da razão cíclica deve crescer ou decrescer, simplesmente realizando a diferença entre o sinal de saída do S/H_{hi} e do S/H_{low}. Se a diferença entre estes sinais for positiva, a referência deve ser aumentada, pois o sistema opera na região A, ou seja, a a razão cíclica atual é menor do que a razão cíclica ótima. Agora, se a diferença entre estes sinais for negativa, a referência deve ser diminuída, pois o sistema opera na região B, ou seja, a a razão cíclica atual é maior do que a razão cíclica ótima. A Figura 6 exemplifica como o somador atua. Na saída do somador tem-se o sinal V_{comp} .

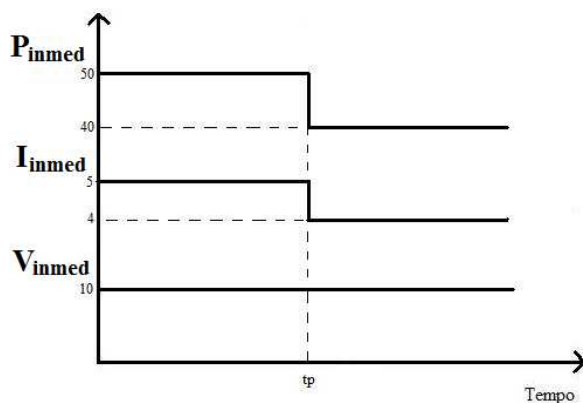


Figura 5 – Exemplo da função do multiplicador.

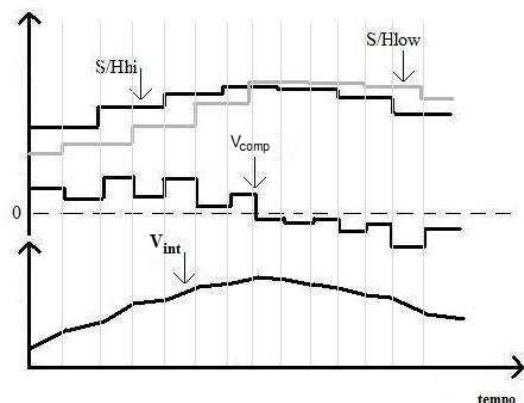


Figura 6 – Funcionamento do somador dos S/H's.

3.6 O Integrador

O integrador atua de forma a tornar a diferença dos sinais de saída dos S/H's em uma referência de razão cíclica para o conversor. O resultado dessa integração foi mostrado anteriormente na Figura 6. O valor de entrada do integrador é transformado em uma rampa crescente caso este seja positivo, em uma rampa decrescente caso o valor de entrada seja negativo ou em uma reta constante caso o valor seja nulo. A inclinação desta rampa depende da amplitude do sinal de entrada. O integrador nesta aplicação, deve possuir uma constante de tempo adequada para que não haja saturação.

Desta forma a malha se fecha e a perturbação pode ser inserida novamente. Este algoritmo é bastante simples do ponto de vista da implementação prática, pois evita o uso de alguns sensores de realimentação do controle.

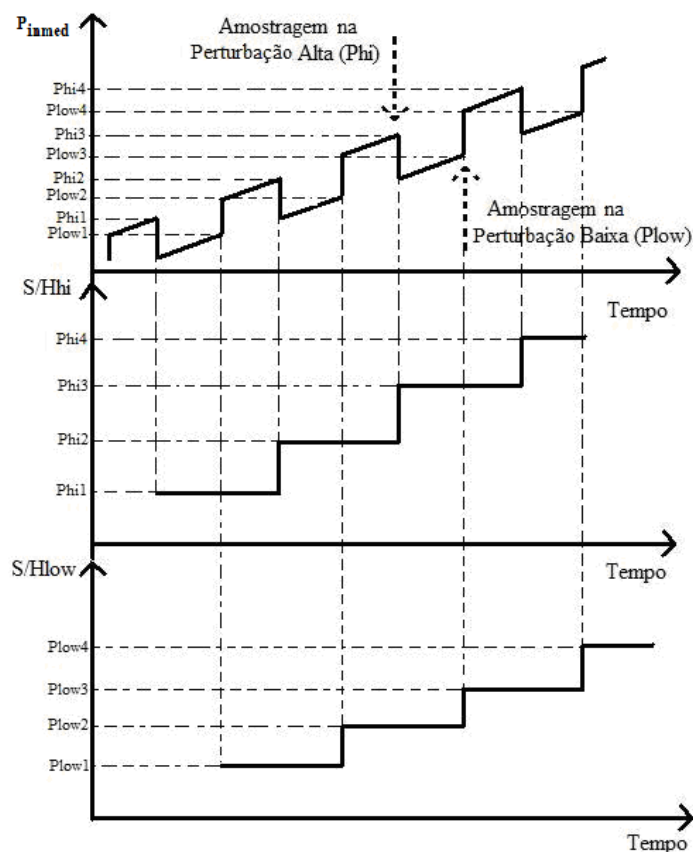


Figura 7 – Funcionamento dos S/H's.

4.0 - A IMPORTÂNCIA DA DINÂMICA DO SISTEMA

Um sistema de geração com gerador AFPM, de forma geral e simplificada, se comporta como apresentado na Figura 8. A corrente estatórica causa um torque contrário ao da força mecânica propulsora causando uma diminuição da rotação, ou seja, a perturbação além de provocar uma mudança na corrente do gerador, causa uma mudança na rotação e consequentemente na tensão de entrada do conversor. A dinâmica da máquina AFPM depende principalmente de sua inércia. Assim, tempo entre as perturbações deve ser maior que o tempo necessário para que o sistema se acomode em um novo patamar de potência.

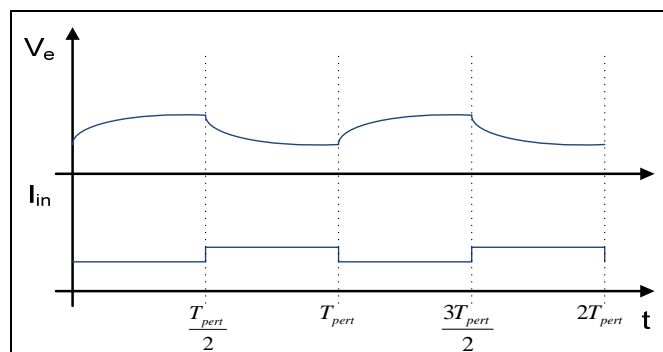


Figura 8 – Comportamento do gerador AFPM.

Outro fator importante é fazer com que a amplitude de perturbação seja a menor possível. Caso a perturbação seja relativamente grande o sistema tende para a instabilidade, podendo levar o rotor ao travamento. Por outro lado uma perturbação de baixa amplitude pode dificultar a observação do comportamento do sistema. Assim, um compromisso deve ser feito entre a mínima perturbação e a observação satisfatória do comportamento do sistema.

Um último comportamento que deve ser levado em conta é o da variação da força propulsora, seja ela a água, o vapor, o vento, etc. A frequência de perturbação deve ser bem maior que a da variação desta força para que não haja interferência significativa na busca do ponto de máxima potência, por exemplo, a frequência de variação da quantidade de água que faz girar uma turbina não deve estar próxima da frequência de perturbação do controle do conversor. Analisando este contexto, verifica-se que para o funcionamento adequado do sistema, a variação da força propulsora deve ser bem lenta e a inércia do gerador deve ser relativamente pequena (pequenos geradores – até 5kVA) para que a frequência de perturbação não seja tão pequena, fazendo assim com que o sistema busque a máxima potência mais rapidamente.

Um exemplo prático: “Uma micro central hidrelétrica de 5kW, que utiliza um gerador elétrico AFPM e não possui reguladores de velocidade, leva 1 segundo para estabilizar a tensão em seus terminais após a aplicação de um degrau de 1% em uma de suas variáveis de controle. A quantidade de água que move o gerador varia ciclicamente durante o período de 24 horas, sendo a quantidade máxima pela manhã e a mínima ao anoitecer”. Neste exemplo, primeiramente deve-se verificar se a leitura que o controle faz do sinal de potência de entrada antes e depois do degrau de perturbação possuem patamares distintos. Caso positivo, mantém-se o degrau de 1%, caso negativo deve-se aumentar o valor do degrau. Deve-se então, ajustar a frequência da perturbação para um valor um pouco menor que 1Hz (período maior que 1 segundo), porém o período deve ser bem menor que 24 horas. A Figura 9 apresenta o espectro de frequência que inclui os subsistemas envolvidos neste trabalho.

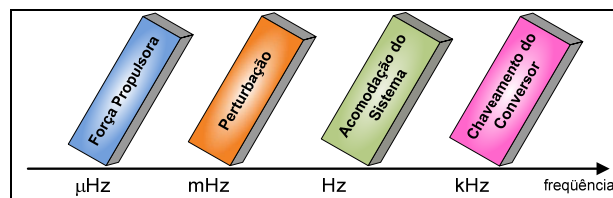


Figura 9 – Espectro simplificado do sistema.

5.0 - SIMULAÇÕES

5.1 Conversor Boost com fonte CC e Bateria

Primeiramente, a simulação deve ser feita apenas utilizando uma fonte CC como entrada do conversor e uma bateria em sua saída. A fonte CC de entrada representa o gerador trifásico + retificador de ponte diodos completa. A indutância CC foi considerada a mesma de uma fase da máquina. A fonte CC terá seu valor de tensão alterado com a inserção de resistores para a verificação do controle de máxima potência. A Figura 10 apresenta o circuito a ser simulado.

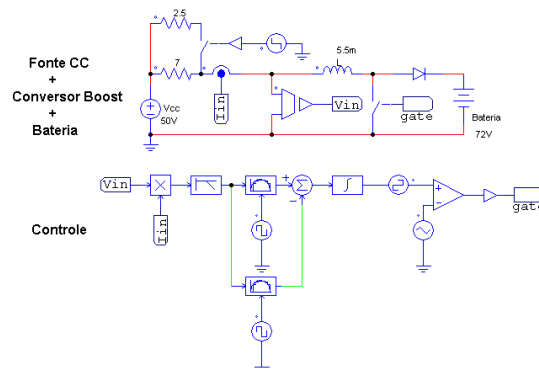


Figura 10 – Circuito para simulação de um sistema com Fonte CC e Bateria.

5.2 Conversor Boost com Gerador AFPM e Inversor

Nesta terceira e última etapa da simulação, foi utilizado um gerador AFPM retificado como entrada do conversor e um banco de capacitores e inversor em sua saída. A força propulsora do gerador teve seu valor alterado para a verificação do controle de máxima potência. A Figura 11 apresenta o circuito a ser simulado.

A Figura 12 e Figura 13 apresentam, respectivamente, as simulações feitas com os seguintes sistemas: Conversor Boost com Fonte CC e Bateria e Conversor Boost com Gerador e Inversor. Na parte superior é mostrada a referência para razão cíclica e na parte inferior a potência de entrada e seus sinais amostrados. Nota-se que para

cada situação de entrada do conversor, neste caso modificando a resistência de entrada ou modificando a velocidade do vento em uma turbina eólica, a potência caminha para o ponto de máximo e se estabiliza apesar dos degraus na razão cíclica, comprovando que o sistema opera na máxima potência possível.

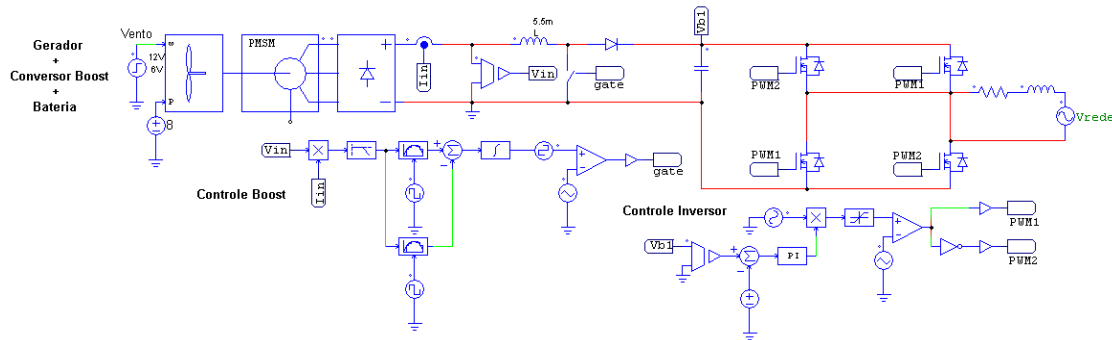


Figura 11 – Circuito para simulação de um sistema com Gerador e Inversor.

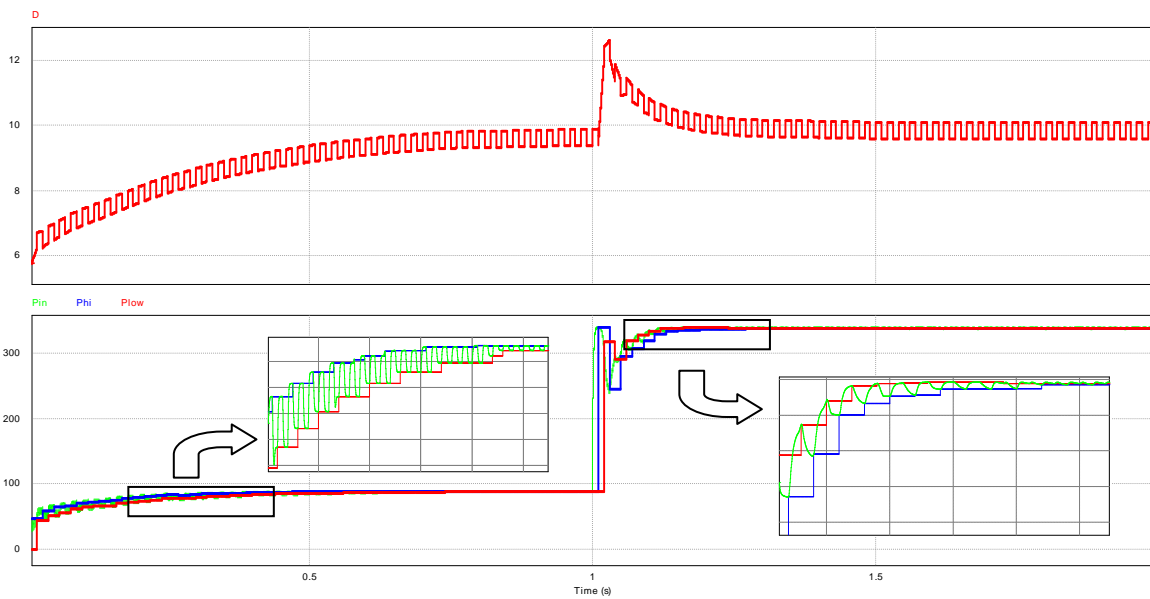


Figura 12 – Simulação de um sistema com Fonte CC e Bateria.

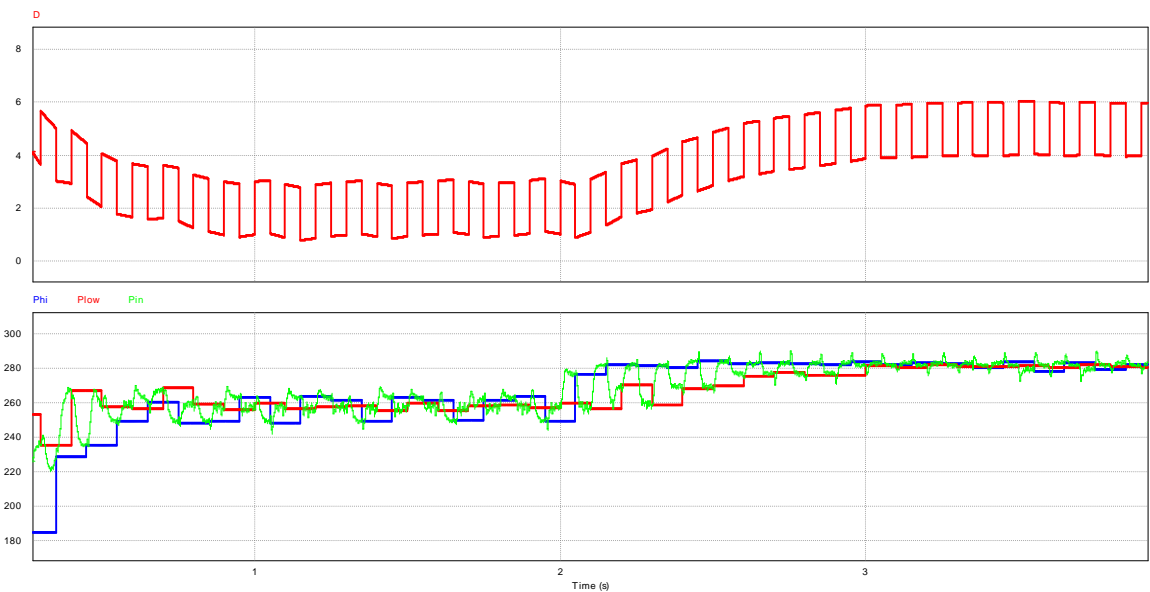


Figura 13 – Simulação de um sistema com Gerador e Inversor.

6.0 - CONCLUSÃO

Verificou-se nas simulações que o conversor tende sempre a manter a máxima potência possível, de forma automática, mesmo quando a fonte elétrica caminha para outro ponto de operação. Foi verificado também que sistema de controle, se mostrou satisfatório e de fácil implementação.

Como sugestão para continuidade deste trabalho, fica a possibilidade de investigar a possibilidade de utilização desta estratégia no controle de outros conversores. Outra sugestão é a implementação em um sistema real com a obtenção de curvas obtidas a partir de um protótipo. Deixa-se claro, porém, que a proposta de conversor e controle apresentados neste trabalho serve para mostrar que a técnica utilizada apresenta bons resultados e que dependendo da aplicação, ajustes nos parâmetros serão necessários para cada sistema de geração em que ele for utilizado.

Olhando para o futuro, as residências contarão com geradores em pequena escala e com sistema de armazenamento de energia, passando a absorver da rede elétrica apenas os montantes de energia que não foram capazes de armazenar e/ou produzir. Para que isso se torne realidade é preciso apenas vencer barreiras de legislação, padronização e escala de produção de equipamentos, pois as barreiras tecnológicas já foram vencidas. A geração distribuída inteligente transforma potencialmente a cidade inteira em uma usina, com perdas mínimas de transmissão, trazendo ganhos expressivos ao uso eficiente de energia. Existe também uma grande oportunidade para a utilização de baterias para acumular energia, sem a necessidade de inversor, pois atualmente grande parte dos eletrônicos e eletrodomésticos residenciais dispõe de “fontes” para retificar a corrente alternada da rede elétrica em corrente contínua.

Com os medidores de energia bi-direcionais, conectados a uma rede de dados, o consumidor, que também é um pequeno gerador, poderá acompanhar se está fornecendo ou recebendo energia da rede elétrica em determinado instante do dia ou durante um período de tempo.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BARBI, I., MARTINS, D.C. Conversores CC-CC Básicos Não Isolados. Florianópolis: Edição do Autor, 2000.
- (2) YAMAMURA, N., ISHIDA, M., HORI, T. “A Simple Wind Power Generating System with Permanent Magnet Type Synchronous Generator”. Dept. Electrical and Electronic Eng., Mie University. IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Hong Kong, 1999.
- (3) GIERAS, J. F., WANG, R. e KAMPER, M. J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 1-4020- 2661-7.
- (4) BOCCUZZI, C.V., MELLO, J.C.O. A Energia do Futuro – Mercados de Atacado e Varejo se Fundindo. XXSNPTEE. Recife. 2010.
- (5) FARRET, F.A. Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica. Santa Maria: UFSM, 1999.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Diogo Cesar Coelho, nascido em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, em 1982, formou-se em Engenharia Elétrica em 2005, na Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Em 2009 obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica, também pela UFSC, na área de Eletrônica de Potência.

Em 2005 estagiou na área de desenvolvimento de inversores da WEG Automação e desde 2007 é empregado da Eletrosul, onde atua no Departamento de Geração (DEG) em projetos elétricos para usinas de geração de energia elétrica