

Aplicação para integração de fontes alternativas de energia elétrica na rede utilizando topologia VSI e controle baseado na tecnologia ARM CORTEX-M3 e supervisor com comunicação MODBUS

Rafael Bezerra de Oliveira¹
rafael.oliveira@senairs.org.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma forma de integração de fontes alternativas de energia elétrica na rede utilizando a topologia VSI (*Voltage Source Inverter*) para realizar o acoplamento da fonte alternativa. A tecnologia ARM CORTEX-M3 foi utilizada como plataforma de gerenciamento e controle digital, onde foi implementada uma estratégia de controle de corrente do tipo PI+*anti-windup* para garantir a qualidade da forma de onda de saída do inversor. Por fim, foi criada uma aplicação de supervisão no *software* Elipse Scada que se comunica com o núcleo de gerenciamento do protótipo através do protocolo MODBUS RTU, onde o fluxo de potência injetado pela fonte alternativa pode ser controlado.

Palavras Chave: Integração de energia alternativa, CORTEX-M3, VSI, Microgrid.

ABSTRACT

This paper presents a form to integrate electrical energy sources to the grid using the VSI topology (Voltage Source Inverter) in order to couple the alternative power source in the grid. The ARM CORTEX-M3 technology was used as managing and digital control platform, where a PI+anti-wind up control strategy was implemented to guarantee the inverter output waveform quality. In the end, a supervisory application was created using the Elipse Scada software which communicates with the prototype managing core through MODBUS RTU protocol, allowing the alternative source power injection control.

Keywords: Alternative energy integration, CORTEX-M3, VSI, Microgrid.

¹ Faculdade de Tecnologia Senai Porto Alegre. Porto Alegre, RS.

1. INTRODUÇÃO

O assunto energia é um dos mais estudados na comunidade científica atual, em razão da crescente demanda mundial. Desta forma, o estudo apresentado neste artigo se enquadra dentro do conceito de *Microgrids*, que caracteriza células que formam uma malha energética inteligente (HOROWITZ et AL, 2010), onde cada célula pode ser formada por uma unidade de compartilhamento energético (consumo/produção) ou por um conjunto de unidades conectadas a um alimentador principal (TONKOSKI et al, 2011). A Figura 1 apresenta um exemplo de diagrama ilustrando uma rede inteligente.

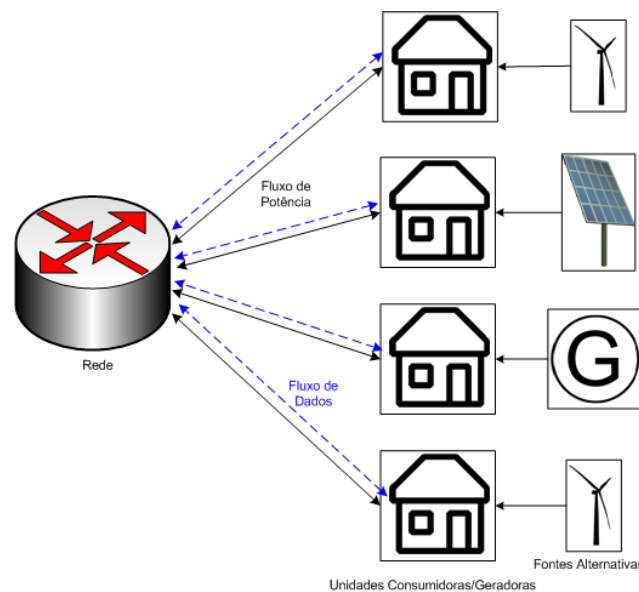


Figura 1 – Exemplo de diagrama de rede inteligente.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

A célula componente da rede conecta-se a esta por apenas um ponto, sendo que pode consumir energia da rede ou fornecer energia pelo mesmo ponto. Assim sendo, tanto a energia fornecida quanto energia consumida precisa de um controle de qualidade, focando em ações que compensem a potência reativa do sistema, para não poluir a rede tanto no caso de fornecimento de energia quanto no caso de consumo.

É apresentada neste documento uma plataforma monofásica para integração de uma fonte alternativa de energia elétrica no sistema, procurando obedecer à idéia do *Microgrid*, utilizando como acoplamento na rede elétrica uma topologia de inversor VSI (*Voltage Source Inverter*) que, por definição, possibilita o fluxo bidirecional de potência (MOHAN et AL, 2003), funcionando como uma fonte de tensão com corrente controlada podendo assumir 4 formas de funcionamento (HOSSEINI et AL, 2011. SOUZA et AL, 2008. FENILI, 2007):

- Corrente drenada senoidal – conversor *boost* de alto fator de potência;
- Corrente drenada formada puramente por harmônicas de corrente da carga – filtro ativo paralelo;
- Corrente injetada senoidal – integração de energia alternativa ativa na rede elétrica;
- Corrente injetada formada por harmônicas de corrente de carga para compensação e fundamental – integração de energia alternativa ativa + reativa na rede elétrica.

A Figura 2 apresenta a topologia VSI com filtragem predominantemente indutiva e a sua integração com a rede elétrica.

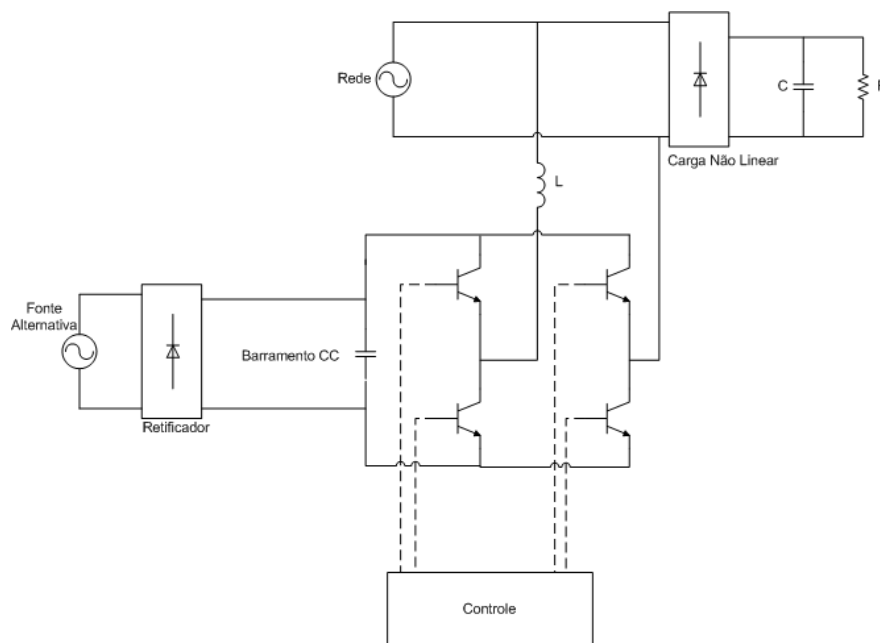


Figura 2 – Topologia VSI com filtragem predominantemente indutiva.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Como fonte alternativa de energia, foi utilizada uma fonte de tensão alternada variável alimentada em um circuito separado da rede principal, conectada a um retificador em ponte completa com tensão de saída fixada em 100Vcc, alimentando o barramento CC da estrutura do inversor, conforme apresentado na Figura 2.

O controle e gerenciamento de energia da estrutura são realizados por um sistema digital formado por dois microcontroladores ARM CORTEX – M3 código LPC1768, cuja performance de processamento apresentou bons resultados em trabalhos anteriores (OLIVEIRA, 2011). Um microcontrolador executa a função de controle da forma de onda de corrente de saída do inversor (escravo) e o outro recebe comandos via protocolo MODBUS – RTU (mestre) de uma aplicação desenvolvida no *software* Elipse Scada e envia a amplitude

da senoide de referência de controle para o primeiro, permitindo o gerenciamento da potência absorvida ou fornecida ao sistema.

A Figura 3 ilustra o controle da estrutura, destacando os dois microcontroladores e a aplicação de supervisor de gerenciamento.

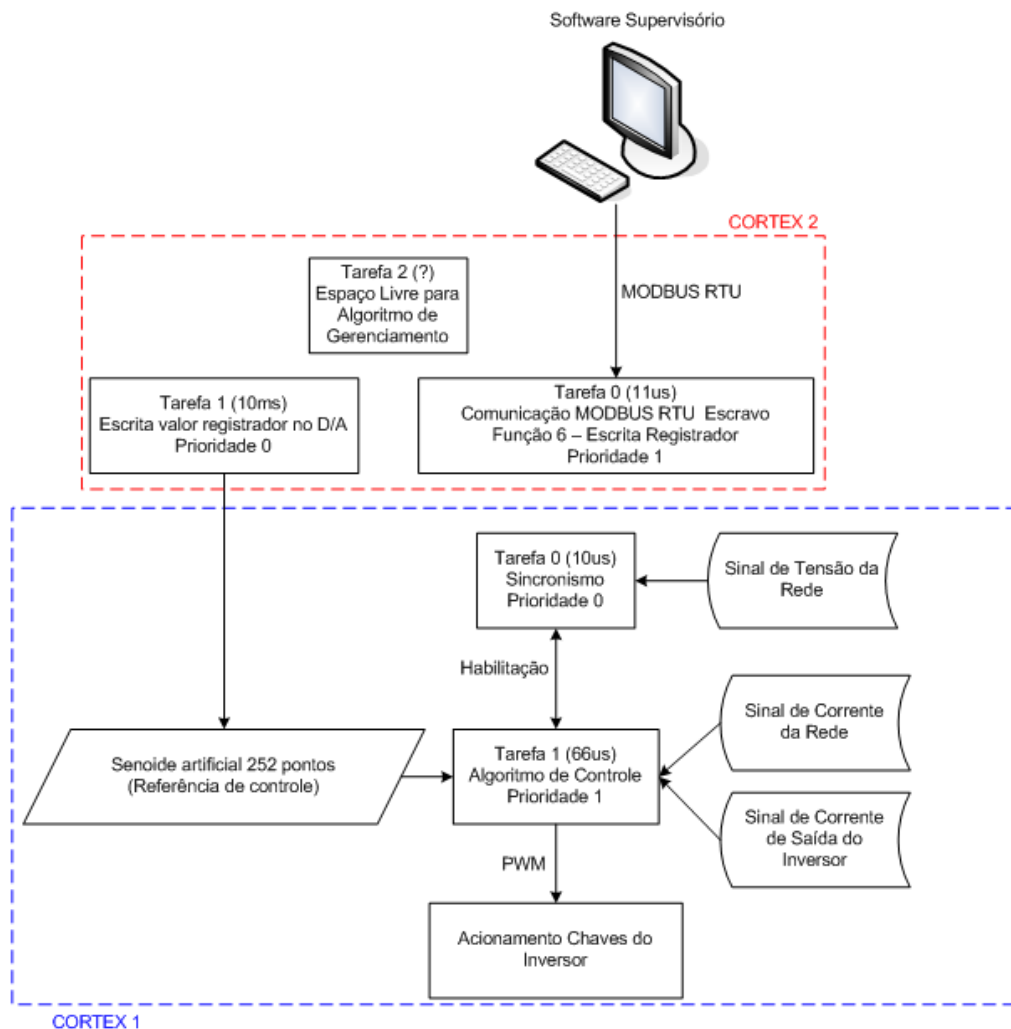


Figura 3 – Estrutura de controle e gerenciamento de energia alternativa.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Em razão de limitações do protótipo nesta fase inicial da pesquisa, não há a correção da potência reativa, apesar da estrutura permitir. É necessário um maior desenvolvimento do filtro de saída do inversor e dos ganhos do controle. Desta forma, a plataforma executa as funções descritas no primeiro e terceiro caso apresentados acima.

2. CONTROLE DE CORRENTE

Quando o inversor VSI conecta-se à rede elétrica, se não houver um controle de corrente, a corrente que imediatamente é drenada limita-se somente à impedância do filtro de entrada, que é bastante reduzida, gerando danos na estrutura de potência.

O controle da forma de onda de corrente na saída do inversor é executado pelo microcontrolador CORTEX escravo, onde foi implementado um algoritmo de controle baseado na estratégia PI, largamente utilizada nas referências estudadas (SOUZA et AL, 2008. ORTMANN et AL, 2008. FENILI, 2007), cuja equação discretizada utilizando o método *Forward* está apresentada na Equação 1.

$$C(z) = kp + \frac{kiTz}{z-1} \quad (1)$$

Onde kp representa o ganho proporcional, ki o ganho integral e T representa o tempo de amostragem.

Calculando a equação diferença da Equação 1, obtém-se o resultado apresentado na Equação 2.

$$u(n) = e(n)[kp + (kiT)] - kpe(n-1) + u(n-1) \quad (2)$$

Onde $u(n)$ representa a saída do controlador na amostra n e $e(n)$ representa o erro do sistema na amostra n .

Porém, em situações onde existe a saturação da saída do sistema, o controle passa a trabalhar em malha aberta após esta saturação e o termo integrativo continua a integrar o valor de erro, podendo levar o sistema à instabilização ou, no mínimo, gera uma diminuição considerável no tempo de resposta. Este efeito é chamado de *Wind up* (ASTROM, 1995).

Para evitar o efeito *wind up* no controle do sistema, é inserido no algoritmo de controle um termo diretamente ativo na resposta do termo integrativo, proporcional à diferença entre a saída saturada e a saída integrada.

O diagrama de blocos de uma estratégia de controle PI com *anti-wind up* é ilustrada na Figura 4.

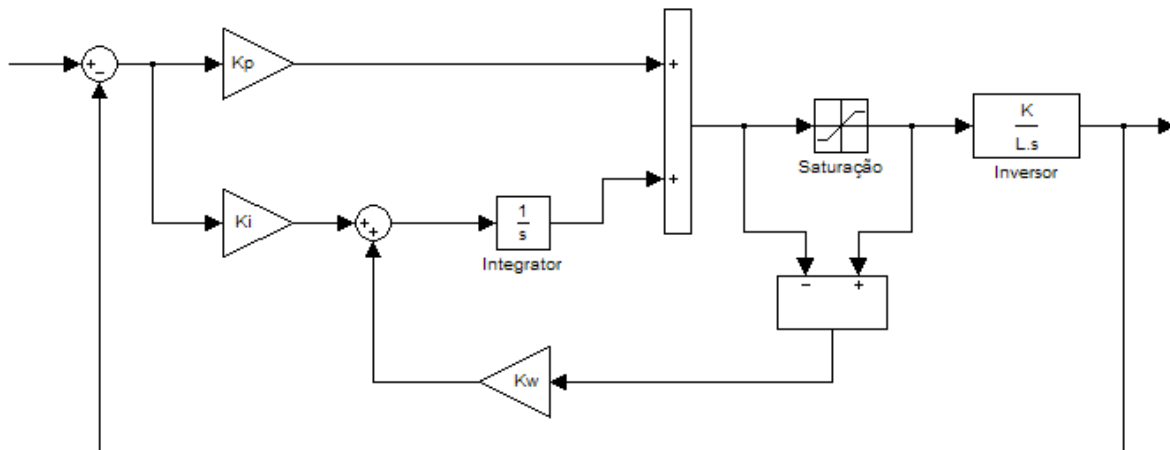


Figura 4 – Diagrama de blocos de uma estratégia de controle PI com *anti-wind up*.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Calculando a equação diferença do diagrama apresentado na Figura 4, obtém-se o resultado apresentado na Equação 3.

$$u(n) = e(n)[kp + (kiT)] - kpe(n-1) + u(n-1) + ew(n)kwT \quad (3)$$

Onde kw representa o ganho da ação *anti-wind up* e $ew(n)$ representa a diferença entre a saída saturada e a saída do termo integrativo.

Analisando o sistema de controle, para obter-se uma resposta rápida às variações de carga e trazer os pólos em z para dentro do círculo unitário, os ganhos do controlador obedecem aos valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Valore de ganhos para o algoritmo de controle

Ganho	Valor
Kp	10
Ki	300000
kw	548

Fonte: OLIVEIRA, 2012

O algoritmo de controle foi implementado utilizando o conceito de sistema de tempo real, onde cada atividade é executada dentro de uma tarefa com prioridade e *deadline* definidos à priori, conforme pode ser observado na Figura 3.

O sistema de controle digital da corrente de saída do inversor foi implementado no microcontrolador CORTEX 1, executado em duas tarefas independentes, porém com um canal de habilitação mútuo, descritas a seguir:

2.1 Tarefa 0 - Sincronismo

Esta tarefa é executada em 10us e possui prioridade 0 (máxima), pois garante que a referência de controle, gerada através da Equação 4, esteja sempre em sincronismo com o sinal de tensão da rede.

$$r(n) = 1 * \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (4)$$

Onde n representa o número da amostra sendo calculada e N representa o número de amostras por ciclo (252).

Muitos autores optam por utilizar a própria senóide da rede elétrica para formar a referência de controle (FENILI, 2007), porém este procedimento pode ocasionar realimentação de ruído pelo canal analógico ou distorção do sinal de referência se a tensão da rede possuir harmônicas. Desta forma, optou-se por utilizar um sinal senoidal gerado matematicamente.

O tempo de 10us foi escolhido por ser mais de seis vezes menor que o tempo determinado pela tarefa 1, responsável pelo processamento da Equação 3, garantindo que a estratégia de controle seja executada sempre em sincronia com a rede, já que apenas quando a situação de sincronismo é atendida, a tarefa 0 habilita a tarefa 1 para ser executada.

A situação de sincronismo acontece quando a tarefa 0 identifica que o sinal de tensão da rede elétrica se encontra atendendo duas situações específicas:

- Senóide dentro da faixa de cruzamento por zero;
- Senóide no semi-ciclo positivo.

2.2 Tarefa 1 – Processamento da Estratégia de Controle

A tarefa 1 é responsável pela execução do controle propriamente dita, em um tempo fixo de 66us. Este tempo foi escolhido para permitir o processamento com folga da Equação 3, que exige também a leitura das correntes da carga e da rede além da leitura do sinal enviado pelo microcontrolador CORTEX 2, que representa a amplitude da senóide que compõe a referência de controle. Desta forma, além do processamento da equação diferença do controle, esta tarefa precisa realizar a leitura de três canais de A/D e o condicionamento de cada um dos sinais.

De acordo com o tempo de execução da tarefa (tempo de amostragem T) calcula-se o número de pontos do sinal senoidal de referência calculado, de forma a manter o tempo de ciclo total de $1/60$, totalizando $N=252$ pontos ou amostras.

Após o processamento do controle, o *duty cycle* do sinal PWM (dois níveis modulado em 30kHz), que comanda as chaves de potência do inversor, é atualizado.

O valor do *duty cycle* satura em 400, quando o sistema *anti-wind up* começa a trabalhar.

Após o término do processamento da estratégia de controle, a tarefa 0 é habilitada novamente, para que o sincronismo possa tornar a ser executado.

3. GERENCIAMENTO

O gerenciamento da energia alternativa injetada ou drenada na rede elétrica pela da estrutura é realizado pelo microcontrolador CORTEX 2, cujas tarefas podem ser visualizadas na Figura 3.

Desta forma, temos um microcontrolador responsável apenas pelo controle da forma de onda de corrente de saída do inversor (CORTEX 1), permitindo que o microcontrolador mestre (CORTEX 2) possa tomar decisões sobre o quanto de energia deve ser drenado ou injetado na rede ou decisões referentes a outros algoritmos de gerenciamento de energia elétrica.

O funcionamento do firmware implementado no CORTEX 2 é executado baseando-se em duas tarefas principais, ilustradas na Figura 3 e descritas a seguir:

3.1 Tarefa 0 – Comunicação MODBUS RTU Escravo

Esta tarefa tem a função de comunicar-se com a aplicação supervisório implementada em um *desktop* utilizando o *software* Eclipse Scada através do protocolo de redes de automação MODBUS RTU, escolhido pela facilidade de implementação e devido ao fato de ser protocolo aberto (MODICON, 1996).

O protocolo MODBUS estabelece um conjunto de funções padrão para que as ações em rede sejam executadas. No caso específico deste trabalho, foi utilizada a função número 6 (*Write Single Register*) de forma a permitir que o usuário envie valores para um registrador interno no CORTEX 2, recebido pela tarefa 0, executada em um *deadline* de 11us, permitindo a comunicação a um *baudrate* de 115200bps, utilizando como camada física o padrão de codificação de mensagens EIA/TIA – 232 (TANENBAUM, 2003).

Esta tarefa possui prioridade 1.

3.2 Tarefa 1 – Leitura do registrador de retenção de dados e escrita no D/A

A Tarefa 1 possui prioridade 0, sendo a tarefa de prioridade mais alta do CORTEX 2. Executa a função de leitura do registrador de retenção de dados na aplicação supervisor e escrita no conversor D/A que está diretamente conectado ao A/D do CORTEX 1 (escravo). Assim, o valor referente à quantidade de potência absorvida ou fornecida escolhido pelo usuário na aplicação executada no *desktop* é transferido diretamente para a referência senoidal do controle executado pelo CORTEX 1.

Esta tarefa ainda permite a implementação de outros algoritmos de gerenciamento de energia, ainda em estudo para futuros testes, haja vista o potencial de processamento e memória disponível no microcontrolador escolhido, LPC1768.

Além desta tarefa, ainda existe a possibilidade de uma tarefa 2, para incremento da capacidade de gerenciamento energético, apresentada na Figura 3.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a coleta de dados experimentais foram utilizados dois equipamentos de marca Fluke, o medidor de qualidade de energia 43B e o medidor de grandezas elétricas do tipo alicate 345, considerados de ótima qualidade e com certificado de calibração.

A estrutura foi testada em quatro situações diferentes:

- Caso 1: Fluxo de potência nulo;
- Caso 2: Fluxo de potência positivo – efeito *boost*;
- Caso 3: Fluxo de potência positivo – fonte alternativa suprindo a carga;
- Caso 4: Fluxo de potência negativo – fonte alternativa suprindo a rede.

4.1 Caso 1: Fluxo de potência nulo

Neste caso, o usuário configura a aplicação para o valor zero do mostrador, conforme apresentado na Figura 5, gerando a amplitude nula do sinal senoidal de referência de controle, anulando o fluxo de potência, ou seja, a estrutura de integração funciona como um circuito aberto.



Figura 5 – Aplicação do *software* Elipse com fluxo de energia nulo.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

As formas de onda de tensão e corrente da rede elétrica, assim como as potências do sistema estão ilustradas na Figura 6, retiradas do medidor 43B.

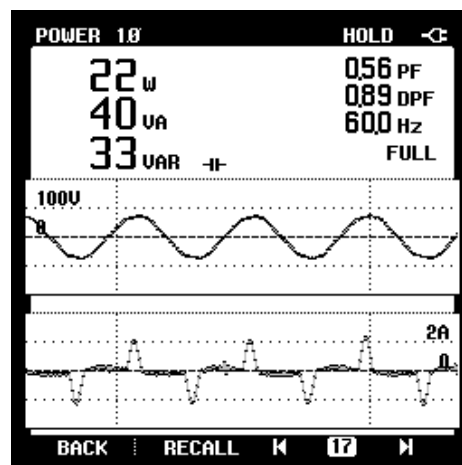


Figura 6 – Imagem retirada do medidor 43B com as formas de onda de corrente e tensão da rede, assim como as potências.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Pode ser observado na Figura 6, que a carga não linear do sistema possui predominância capacitiva com alto grau de distorção harmônica (OLIVEIRA, 2005), sendo que a ação da plataforma de integração energética é nula, como pode ser observado na forma de onda de corrente, considerando que a forma de onda de referência é sempre uma senoide neste trabalho específico.

Conforme relatado anteriormente, esta estrutura tem capacidade para o condicionamento da potência reativa também, porém o protótipo está limitado ao trabalho com a potência ativa no presente momento.

A Figura 7 mostra a tensão do barramento CC do inversor originária da retificação da tensão alternada da fonte alternativa de energia e fixa em 100Vcc.

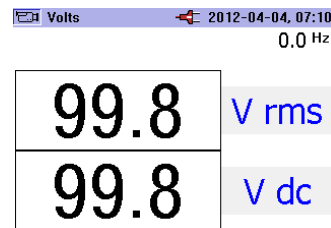


Figura 7 – Imagem retirada do medidor 345 com o valor de tensão do barramento CC do inversor.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

4.2 Caso 2: Fluxo de potência positivo – efeito *boost*

A topologia VSI se comporta de forma bidirecional conforme comentado anteriormente, sendo que quando a corrente é drenada pelo inversor, o campo magnético armazenado no indutor de filtragem, ilustrado na Figura 2, se comporta como fonte de tensão somando-se à tensão da rede. Desta forma, o inversor comporta-se como um conversor *boost* de alto fator de potência (HPFC – *High Power Factor Converter*), visto que a forma de onda de corrente de entrada é senoidal, conforme pode ser observado na Figura 9.

Para que o efeito descrito neste item seja executado pela estrutura, o usuário necessita agir no *software* supervisorio direcionando o mostrador para o campo amarelo, ilustrado na Figura 8.



Figura 8 – Aplicação do *software* Elipse com fluxo de energia positivo e efeito *boost*.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Pode ser observado na Figura 9 que o sinal senoidal drenado pelo inversor para realizar o efeito *boost* soma-se a corrente da carga, aumentando a potência ativa consumida.

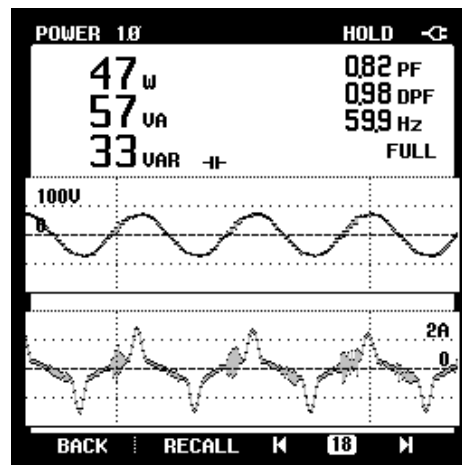


Figura 9 – Imagem retirada do medidor 43B com as formas de onda de corrente e tensão da rede e a estrutura comportando-se como conversor *boost*.

Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Também pode ser observado que a potência reativa total mantém-se a mesma, comprovando que o sinal de corrente de entrada do inversor realmente é senoidal puro, obedecendo a estratégia de controle digital executado pelo microcontrolador CORTEX 1.

A Figura 10 apresenta o valor de tensão no barramento CC, 25% maior do que a tensão de saída do retificador no primeiro caso, apresentada na Figura 7, em razão do efeito *boost*. Neste caso, a fonte de energia alternativa pode ser desativada, pois a alimentação do barramento CC está sendo realizada pela rede.

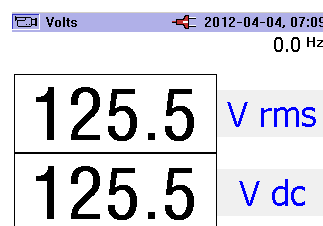


Figura 10 – Imagem retirada do medidor 345 com o valor de tensão do barramento CC do inversor sob efeito *boost*.

Fonte: OLIVEIRA, 2012.

4.3 Caso 3: Fluxo de potência positivo – fonte alternativa suprindo a carga

Neste caso, o usuário move o indicador do mostrador para a área verde, onde o sinal senoidal de referência de controle inverte o sentido, invertendo também o fluxo de potência no inversor, fazendo com que este forneça energia para a rede.

A Figura 11 ilustra a tela do software supervisório com o indicador mostrando a atuação da estrutura na área verde.



Figura 11 – Aplicação do *software* Elipse com fluxo de energia positivo e fornecendo energia para a carga.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

A proporção de potência fornecida, configurada através do supervisório apresentado na Figura 11, é suficiente para suprir inteiramente a potência ativa exigida pela carga, deixando apenas a potência reativa a ser fornecida pela rede, conforme pode ser observado na Figura 12, gerando uma leitura de potência ativa, sob o ponto de vista da rede, nula.

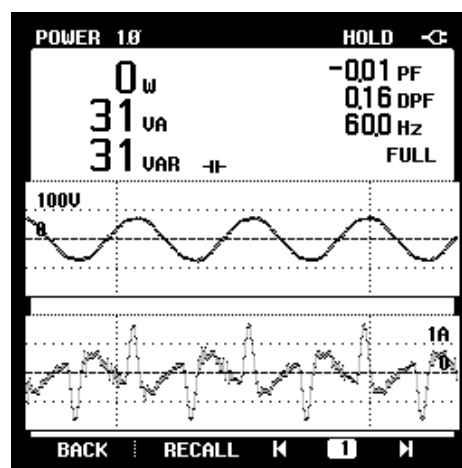


Figura 12 – Imagem retirada do medidor 43B com as formas de onda de corrente e tensão da rede e a estrutura alimentando a carga.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

Também é interessante ressaltar que a forma de onda de corrente da rede ilustrada na Figura 12, agora possui somada a si um sinal senoidal de fase 180° em relação ao sinal de tensão, confirmando o fornecimento de energia alternativa.

A tensão do barramento CC volta ao valor próximo a 100V, considerando que o efeito *boost* não mais acontece neste caso e o fluxo de potência tem agora o seu sentido invertido.

4.4 Caso 4: Fluxo de potência negativo – fonte alternativa suprindo a rede

Neste último caso, o inversor entrega potência à rede elétrica, tendo ultrapassado o limite da potência ativa consumida pela carga e invertendo o fluxo de potência na própria rede. Nesta situação, o *microgrid* constituído pela estrutura em estudo mais as fontes de energia alternativa, estaria vendendo energia ao sistema de distribuição, que seria comprada pela concessionária e entregue a outro ponto de consumo que estivesse necessitando.

A Figura 13 mostra o indicador mais adiante na área verde na tela do *software* supervisor, gerando uma maior amplitude no sinal senoidal de referência de controle implicando na entrega de mais potência à rede.



Figura 13 – Aplicação do *software* Elipse com fluxo de potência negativo.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

As formas de onda de tensão e corrente rede estão ilustradas na Figura 14, onde pode ser observado também que, além de alimentar a potência ativa da carga, a estrutura está entregando à rede 25W extras.

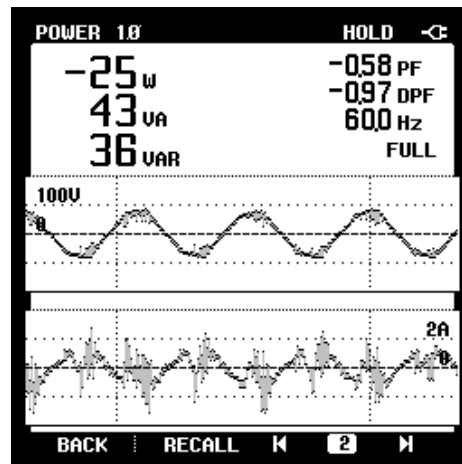


Figura 14 – Imagem retirada do medidor 43B com as formas de onda de corrente e tensão da rede e fluxo de potência negativo.
Fonte: OLIVEIRA, 2012.

5. CONCLUSÃO

Através do conhecimento adquirido na execução deste trabalho e a análise dos resultados experimentais, conclui-se que a estrutura desenvolvida atendeu às expectativas iniciais às quais se propôs, possibilitando o gerenciamento, ainda que não otimizado, de uma fonte de energia alternativa através de uma interface amigável e simples, trabalhando como mestre de um sistema de controle mais complexo.

Observou-se nesta fase atual da pesquisa, que para atender todo o funcionamento da estrutura é necessário um investimento maior no filtro de saída do inversor, para que o mesmo tenha uma melhor resposta a derivadas mais altas de corrente, possibilitando, além do fornecimento de potência ativa, potência reativa, garantindo o fator de potência próximo da unidade tanto no consumo quanto no fornecimento de energia.

Outro ponto a ser desenvolvido futuramente é um algoritmo de gerenciamento de diversas fontes de energia alternativa para uma integração e utilização otimizada das mesmas. Pretende-se implementar tal algoritmo no microcontrolador CORTEX 2, conforme comentado no item 3

6. REFERÊNCIAS

ASTROM, K. HAGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. USA. ISA – Instrument Society of America, 1995.

FENILI, Murilo de Pieri. Estudo e Implementação de um Filtro Ativo Paralelo Monofásico de 8kVA. Florianópolis-SC. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

HOROWITZ, Stanley H. PHADKE, Arun G. RENZ, Bruce A. The Future of Power Transmission. IEEE Power & Energy Magazine. USA. IEEE, 2010. p. 4-10.
SANTACANA, Enrique. RACKLIFFE, Gary. TANG, Le. FENG, Xiaoming. Getting Smart. IEEE Power & Energy Magazine. USA. IEEE, 2010. p. 11-18.

HOSSEINI, S. H. NEJABATKHAH, F. DANYALI, S. Grid-Connected Three-Input PV/FC/Battery Power System with Active Power Filter Capability. Manchester, UK. Innovative Smart Grid Technologies – ISGT, 2011.

MODICON. Modbus Protocol Reference Guide. Massachusetts. MODICON, Inc., Industrial Automation Systems, 1996.

MOHAN, Ned. UNDELAND, Tore M. ROBBINS, Willian P. Power Electronics: Converters, Applications and Design. USA. John Wiley & Sons, INC, 2003.

OLIVEIRA, Rafael B. LIBANO, Fausto B. Energy efficiency optimization algorithm for roadway illumination using ARM7TDMI architecture. Sweden. World Renewable Energy Congress-WREC. Linkoping University Electronic Press, 2011. p. 883-890.

OLIVEIRA, Rafael Bezerra de. Estudo e desenvolvimento de uma plataforma DSP para implementação de estratégias de controle de filtros ativos monofásicos paralelos. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2005.

ORTMANN, Márcio S. MUSSA, Samir A. Filtro Ativo Trifásico Paralelo com Controle no Sistema de Referência Síncrona. Poços de Caldas. Induscon, 2008.

SOUZA, Kleber C. A. de. MARTINS, Denizar C. A Single-Phase Active Power Filter Based in a Grid-Connected PV System. Poços de Caldas. Induscon, 2008.

TANENBAUM, Andrew S. Redes de Computadores. Rio de Janeiro. Elsevier, 2003.

TONKOSKI, Reinaldo. LOPES, Luiz A. C. Impact of Active Power Curtailment on Overvoltage Prevention and Energy Production of PV Inverters Connected to Low Voltage Residential Feeders. Renewable Energy Maganize. Canada. Elsevier, 2011.