

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO DE CONTROLE DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA
DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS
A ALIMENTADORES RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

RODRIGO SANTOS JUNGES

ORIENTADOR: RAFAEL AMARAL SHAYANI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE. DM - 486/2012

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2012

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO DE CONTROLE DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA
DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS
A ALIMENTADORES RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

RODRIGO SANTOS JUNGES

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.

APROVADA POR:

Rafael Amaral Shayani, Dr., (ENE/UnB)
(Orientador)

Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, Dr., (ENE/UnB)
(Examinador Interno)

José Antonio Lambert, Dr., (ENE/UFMT)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 10 DE AGOSTO DE 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

JUNGES, RODRIGO SANTOS

Método de controle de injeção de potência de painéis fotovoltaicos conectados a alimentadores radiais de distribuição.

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Energia solar fotovoltaica. 2. Controle de despacho.

3. Sistema fotovoltaico conectado. 4. Controle *ZigBee*.

I. ENE/FT/UnB. II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JUNGES, R. S. (2012). Método de controle de injeção de potência de painéis fotovoltaicos conectados a alimentadores radiais de distribuição. Dissertação de mestrado em engenharia elétrica, publicação PPGENE. DM - 486/2012, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 137p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Rodrigo Santos Junges.

TÍTULO: Método de controle de injeção de potência de painéis fotovoltaicos conectados a alimentadores radiais de distribuição.

GRAU: Mestre ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília (UNB), e ao Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), permissão para reproduzir cópias dessa dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Rodrigo Santos Junges

Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Elétrica

Caixa Postal 4386 – CEP 70904-970 – Brasília – DF – Brasil

rodrigo.junges@cba.ifmt.edu.br

Dedicado a...

Ao meu amado filho Lucas, que este trabalho seja motivo de inspiração em sua busca de um futuro promissor...

AGRADECIMENTOS

À minha amada esposa Cristina, pela compreensão e dedicação em me auxiliar com minha pesquisa e com as atividades cotidianas, mas principalmente por ser capaz de superar obstáculos para preencher as lacunas nos dias mais difíceis.

Aos meus pais, pelo suporte e paciência sempre presentes, principalmente durante os períodos de ausência.

Ao meu orientador Rafael Amaral Shayani, pela dedicação, presteza e compartilhamento de seus estudos do sistema fotovoltaico.

Agradeço ao professor Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, pela grande oportunidade e precisão técnica com que conduz estes estudos, além de admirável capacidade de organização.

Agradeço o prestigiado professor e amigo José Antonio Lambert pela inspiração e liderança no desenvolvimento da eletrônica em minha carreira, assim como na de incontáveis colegas em Mato Grosso.

Agradeço aos meus colegas do MINTER e do IFMT que de alguma forma contribuíram e permitiram, seja direta ou indiretamente, a realização deste estudo.

Agradeço também aos coordenadores e demais cargos administrativos que gerenciam, mantêm ou de alguma forma dão suporte à pesquisa e desenvolvimento neste país.

Agradeço aos colegas citados na referência bibliográfica e inclusive aos internacionais onde o seu empenho e dedicação ao conhecimento os tornam notórios em suas áreas de atuação.

Agradeço ao revisor deste texto pelo olhar clínico que permite a este texto uma correta interpretação ao que se propõe.

E finalmente agradeço ao grande criador cósmico que nos deu tudo, o laboratório da vida, as equações e as capacidades para realizar este e outros trabalhos.

“É nossa esperança que os engenheiros que lerem este trabalho, se dedicarão para a criação de um mundo, onde seus filhos e netos terão um ar que possam respirar e água que possam beber, onde os seres humanos e o resto da natureza vão nutrir um ao outro.”

(MESSENGER e VENTRE, 2010)

“Nós não herdamos este mundo de nossos pais. Estamos a tomá-lo emprestado de nossos filhos.”

(Autor desconhecido)

RESUMO

MÉTODO DE CONTROLE DE INJEÇÃO DE POTÊNCIA DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A ALIMENTADORES RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

O mundo apresenta hoje uma demanda por geração elétrica proveniente de energias renováveis, o que é louvável para que o progresso humano ocorra de forma sustentável. Estudar esses tipos alternativos de geração e suas particularidades, apoiando-se em estudos científicos, levanta a necessidade de adequar estes novos tipos de geração ao sistema elétrico de distribuição que já existe. Este trabalho propõe um método de conexão inteligente entre sistemas de geração distribuída fotovoltaica - GDFV e os convencionais alimentadores radiais de distribuição. Ainda considera e executa esquemas de proteção com o controle de tensão e corrente, alterando os parâmetros de geração no ponto de conexão e permite-se assistir remotamente pela concessionária de energia. Permite ainda, um sistema de controle automático de geração, parametrizado pelas leituras e demandas dos alimentadores radiais de distribuição no subsistema abaixo dos transformadores de 13,8V. Neste trabalho é apresentado o protótipo que resolve os detalhes da conexão fotovoltaica, a lógica de controle, o algoritmo, os detalhamentos construtivos, e os resultados colhidos na sua experimentação.

PALAVRAS CHAVES: geração distribuída, alimentadores radiais, painéis fotovoltaicos, redes inteligentes.

ABSTRACT

INJECTION CONTROL METHOD OF POWER PHOTOVOLTAIC PANELS CONNECTED TO RADIAL DISTRIBUTION FEEDERS

The world today presents a demand for electricity generation from renewable energies, which is commendable for human progress occurs in a sustainable manner. Studying these alternative types of generation and its particularities, relying on scientific studies, raises the need to match these new types of generation to the electric distribution system that already exists. This paper proposes a method of intelligent connection between distributed photovoltaic generation systems - DPGS and conventional radial distribution feeders. Still feels and performs protection schemes with the control voltage and current, changing the faces of generation at the connection point and allowed to attend remotely by power utility. It also allows an automatic control system generation, parameterized by the readings and demands of radial feeders in distribution transformers subsystem below 13.8 V. This paper presents a prototype that solves the photovoltaic connection details, control logic, the algorithm, the construction drawings, and the results collected in his trial.

KEY WORDS: distributed generation, radial feeders, photovoltaic panels, smart grid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - <i>Compromissos do Brasil para redução de gases de efeito estufa CO₂ (Modificado).</i> ...	9
Figura 2.2 - <i>Instalações da MPX, TAUÁ, primeira usina solar brasileira.</i>	14
Figura 2.3 - <i>Aproveitamento fotovoltaico utilizando poste de distribuição pela PSE&G.</i>	15
Figura 2.4 - <i>Alimentadores radiais de distribuição 13,8 kVac.</i>	17
Figura 2.5 - <i>Imóvel com Geração Distribuída.</i>	18
Figura 2.6 - <i>Mapa Solarimétrico Brasileiro Radiação Solar Global</i>	23
Figura 2.7 - <i>Expectativa de vida útil do painel fotovoltaico e retorno da energia despendida na fabricação.</i>	25
Figura 2.8 - <i>Diagrama Básico da GDFV modelo mais simples.</i>	30
Figura 2.9 - <i>Transistor por Efeito de Campo Metal Oxido Semicondutor - MOSFET.</i>	33
Figura 2.10 - <i>Entrega de potência do sinal PWM - Ciclos de trabalho.</i>	34
Figura 2.11 - <i>Conversor monofásico com forma de onda quadrada.</i>	35
Figura 2.12 - <i>Onda Semi Quadrada.</i>	35
Figura 2.13 - <i>SPWM - Sinal típico de um conversor PWM ideal em dois níveis.</i>	36
Figura 2.14 - <i>SPWM Aplicado em tensão de Fase e Linha; (a) SPWM completo modulação por largura de pulso em dois níveis; (b) modulação a três níveis (positivo, zero e negativo);(c) conteúdo harmônico a dois níveis;(d) conteúdo harmônico de saída do inversor correspondente à modulação a três níveis.</i>	37
Figura 2.15 - <i>Exemplo de curva de corrente x tensão de um painel fotovoltaico, aplicando rastreamento MPPT</i>	38
Figura 2.16 - <i>Exemplo de algoritmo de controle conhecido “Perturb and Observe”, monitora a curva de corrente x tensão MPPT.</i>	39
Figura 3.1 - <i>Método de conexão que atende as demandas do PRODIST 2012.</i>	43
Figura 3.2 - <i>Esquema de conexão do módulo de controle CC.</i>	43
Figura 3.3 - <i>Fluxograma do método de controle utilizado, valores em PU - Algoritmo.</i>	45
Figura 3.4 - <i>Localização dos sensores de corrente e tensão.</i>	46
Figura 3.5 - <i>Módulos de controle CC e módulo coordenador.</i>	48
Figura 3.6 - <i>Método de controle aplicado à planta FV comunicação ZigBee.</i>	49
Figura 3.7 - <i>Módulo ZigBee comunicação bilateral Full Bridge</i>	50
Figura 3.8 - <i>Módulos ZigBee Diferentes Topologias comunicação bilateral Full Bridge</i>	53
Figura 3.9 - <i>Quatro conversores de 250 W, em paralelo</i>	55
Figura 3.10 - <i>Localização do método de controle.</i>	56
Figura 3.11 - <i>Conversor GRID TIE Painéis de indicação e conexão</i>	57
Figura 3.12 - <i>Kit de Desenvolvimento Arduino UNO.</i>	57

Figura 3.13 - <i>Placas opcionais que podem ser úteis de acordo com o projeto (shields).</i>	58
Figura 3.14 - <i>Pinagens e detalhes construtivos da plataforma Arduino UNO.</i>	60
Figura 3.15 - <i>Extensão para a gravação dos módulos ZigBee para Arduino.</i>	60
Figura 3.16 - <i>Placa para Sensor de Corrente o ACS714LLCTR-30A-T.</i>	61
Figura 3.17 - <i>Circuito da placa do Sensor de Corrente o ACS714LLCTR-30A-T.</i>	62
Figura 3.18 - <i>Adaptador USB INT700 para módulos ZigBee - Xbee.</i>	63
Figura 3.19 - <i>Descrição das funcionalidades da Placa.</i>	63
Figura 3.20 - <i>Medidor de energia P4400.</i>	65
Figura 3.21 - <i>Detalhamento das funções do medidor de energia P4400.</i>	66
Figura 3.22 - <i>Display de LCD 16X2.</i>	67
Figura 3.23 - <i>Suporte com quatro painéis solares Siemens SP-75.</i>	68
Figura 4.1 - <i>Visão interna do módulo de controle CC.</i>	70
Figura 4.2 - <i>Circuito eletrônico do módulo de controle CC com os painéis sendo representados por baterias apenas para fins de simulação no ISIS.</i>	72
Figura 4.3 - <i>Protoboard utilizado na montagem dos circuitos eletrônicos, ensaios e testes.</i>	74
Figura 4.4 - <i>Caminho percorrido pelo sinal de corrente até o display.</i>	75
Figura 4.5 - <i>Soquete do módulo ZigBee e o módulo ZB/ROSI com a sua respectiva pinagem.</i>	75
Figura 4.6 - <i>Layout do circuito da placa, módulo de controle CC.</i>	77
Figura 4.7 - <i>Disposição dos componentes da placa e do circuito, detalhamento 3D.</i>	77
Figura 4.8 - <i>Parte inferior da placa de conexão, estação ZigBee, circuito 3D.</i>	78
Figura 4.9 - <i>Descrição da confecção artesanal da placa eletrônica do protótipo.</i>	79
Figura 4.10 - <i>Placa eletrônica do módulo de controle CC via módulo ZigBee - Xbee PRO.</i>	80
Figura 4.11 - <i>Módulo coordenador diagrama funcional.</i>	83
Figura 4.12 - <i>Circuito eletrônico do módulo coordenador.</i>	84
Figura 4.13 - <i>Pinagem do display de LCD.</i>	85
Figura 4.14 - <i>Módulo coordenador composto por kit XBee-PRO com Arduino UNO-ATmega328 chaves e Display.</i>	86
Figura 4.15 - <i>Tela de acesso ao Módulo ZigBee.</i>	89
Figura 4.16 - <i>Tela do programa X-CTU, com detalhe do terminal de comandos AT.</i>	90
Figura 4.17 - <i>Janela de Configuração do módulo ZigBee.</i>	91
Figura 4.18 - <i>Modem atual.</i>	92
Figura 4.19 - <i>Software de programação C++ para Arduino.</i>	93
Figura 4.20 - <i>Software de programação C++ para Arduino.</i>	94
Figura 4.21 - <i>Instalação completa do módulo de controle CC, conversores GRID TIE, medidor de energia.</i>	95
Figura 4.22 - <i>Detalhe do módulo de controle CC, conversores GRID TIE instalados e medidor de energia com todos os canais ativados.</i>	96

Figura 4.23 - <i>Módulos testados (Protótipos)</i>	97
Figura 4.24 - <i>Aumento de geração conforme o acionamento das chaves no módulo coordenador.</i>	98
Figura 4.25 - <i>Aumento de geração conforme o acionamento das chaves no módulo coordenador.</i>	98
Figura 4.26 - <i>Desligamentos de painel por nível de tensão proteção do algoritmo de controle</i>	99
Figura 4.27 - <i>Desligamentos de painel por nível de corrente no barramento CC, proteção do algoritmo de controle.</i>	100
Figura 4.28 - <i>Desligamentos de painel por falta de autorização da concessionária, bloqueio por chaves do algoritmo de controle à distância.</i>	101
Figura 4.29 - <i>Esquema montado para a experiência de qualidade da energia.</i>	102
Figura 4.30 - <i>Analizador de energia ET-5060C-1102 utilizado nos ensaios.</i>	103
Figura 4.31 - <i>Forma de onda no tempo do sinal injetado na rede no domínio do tempo.</i>	103
Figura 4.32 - <i>Conteúdo harmônico do conversor GTI GRID TIE: (a) Harmônicas de tensão no domínio da frequência; (b) Harmônicas de corrente no domínio da frequência.</i>	104
Figura 4.33 - <i>Diagrama montado com lâmpada em paralelo com a tomada, valores para comparação.</i>	105
Figura 4.34 - <i>Sinal de Carga Resistiva e Harmônica: (a) Sinal de tensão e corrente no domínio do tempo; (b) Harmônicas de tensão no domínio da frequência;(c) Harmônicas de corrente no domínio da frequência.</i>	106

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - <i>Oferta interna de energia elétrica por fonte 2010 (Modificado)</i>	10
Gráfico 2.2 - <i>Oferta interna de energia no Brasil</i>	10
Gráfico 2.3 - <i>Geração de energia por tipo de combustível no Brasil</i>	11
Gráfico 4.1 - <i>Gráfico Limítrofe de tensão de acordo com a conexão dos painéis e a potência injetada, com precisão de 0,001 do mínimo ao máximo</i>	100
Gráfico 4.2 - <i>Desconexão dos painéis por limite de corrente, com precisão de 0,01 do mínimo ao máximo</i>	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - <i>Quantidade de BTU/HAB/DIA do Brasil (Unidade Britânica)</i>	7
Quadro 2.2 - <i>Emissões totais de CO2 no BRICS*</i>	9
Quadro 2.3 - <i>Composição da tarifa de energia</i>	18
Quadro 2.4 - <i>Requisitos mínimos em função da potência instalada</i>	29
Quadro 3.1 - <i>Descrição dos LEDs indicadores</i>	64
Quadro 3.2 - <i>Pinagem suportada aos módulos XBee</i>	64
Quadro 3.3 - <i>Especificações técnicas do medidor de energia utilizado</i>	65
Quadro 3.4 - <i>Parâmetros Elétricos de placa do Painel Fotovoltaico SIEMENS</i>	68
Quadro 4.1 - <i>Pinos do módulo ZigBee suas respectivas funções</i>	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - <i>Elasticidade - renda do consumo de energia elétrica (Modificado)</i>	12
Tabela 2.2 - <i>Evolução do preço do petróleo tipo Brent</i>	16
Tabela 2.3 - <i>Reajustes praticados pelas concessionárias de energia</i>	19
Tabela 2.4 - <i>Sistema nacional interligado e subsistemas: Índice de perdas na transmissão de energia elétrica (%)</i>	20
Tabela 4.1 - <i>Custos de componentes para o desenvolvimento dos protótipos</i>	87

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ADSL	(<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>) rede de dados
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ARDUINO	Plataforma de programação que utiliza C/C++
ARES	Simulador de placas de circuito eletrônico
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento
BRENT	Classificação de petróleo cru, <i>crude oil (petroleum)</i>
BRICS	Países em desenvolvimento Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
BTU	Unidade tradicional de energia (<i>British Thermal Unit</i>)
C++	Linguagem de programação de alto nível de interação
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CEMAT	Centrais Elétricas Matogrossenses S.A.
CONVERTOR	Conversor de energia transforma a tensão contínua em tensão alternada
COP15	Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
CDGD	Centro de despacho de geração distribuída
CFTV	Circuito privado de vigilância eletrônica
DAEE	Departamento da Área de Eletro Eletrônica
DVR	(<i>Digital Video Recorder</i>), servidor de internet para CFTV
FFD	Dispositivo de função completa (<i>Full Function Device</i>)
FLEX-FUEL	Automóvel que aceita etanol ou gasolina em qualquer proporção
FUNTEC	Fundação do desenvolvimento de Tecnópolis
FV	Fotovoltaica
HTML	Linguagem de Marcação de Hipertexto, utilizada para produzir páginas na Internet
GD	Geração distribuída
GDFV	Geração distribuída fotovoltaica
GRID TIE	Conversor de energia conectado à rede elétrica convencional
IGBT	Transistor bipolar de porta isolada

IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IFMT	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Mato Grosso
ISIS	Simulador de circuitos eletrônicos
LCD	Tipo de tela eletrônica (<i>Liquid Crystal Display</i>)
LED	Emissor de luz (<i>light-emitting diode</i>)
MESH	Tipo de comunicação em rede (malha)
MOSFET	Componente eletrônico (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)
MPPT	Tecnologia de maior eficiência (<i>Maximum Power Point Tracking</i>)
NETLIST	Lista de componentes e relação de conexão dos circuitos
PIC	Microcontrolador fabricado pela empresa Microchip Technology
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PWM	Modulação em conversor de energia (<i>Pulse - width modulation</i>)
RF	Rádio frequência
RFD	Dispositivo função reduzida (<i>Reduced Function Device</i>)
SiGS	Silício de grau solar
SPWM	Modulação em largura de pulso senoidal
SMART GRID	Rede Inteligente, tecnologia da informação em rede de energia
TBLOCK	Conectores do tipo parafusável (Terminal Blocks)
UNO	Plataforma de programação eletrônica <i>open-source</i> desenvolvida por Arduino© (ARDUINO, 2012)
X-CTU	Interface de configuração de módulos <i>ZigBee</i> © fornecido pelo fabricante.
ZigBee	Protocolo de comunicação desenvolvido pela <i>ZigBee Alliance</i> ©

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – ESTRUTURAS DO TEXTO	6
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 - MOTIVAÇÕES DO PRESENTE ESTUDO.....	7
2.1.1 - A energia e o homem	7
2.1.2 - Fontes de energia e emissão de CO ²	8
2.1.3 - Aproveitamentos fotovoltaicos e GD.....	12
2.1.4 - Economia verde: novas possibilidades para energia fotovoltaica.	23
2.1.5 - Alternativas ao petróleo no Brasil.....	26
2.1.6 - Aspectos gerais da conexão fotovoltaica	27
2.1.7 - Regulamentação da conexão, incentivos e limitações.	28
2.2 – MÉTODOS DE CONTROLE DE ENERGIA.....	32
2.2.1 - Modulação por Largura de Pulso PWM	32
2.2.2 - PWM Aplicado a Conversores de Frequência	34
2.2.3 - O Algoritmo MPPT	38
3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1 – DEFINIÇÕES PARA O MÉTODO PROPOSTO	41
3.2 – MÉTODO DE CONTROLE.....	42
3.3 – ALGORITMO DE CONTROLE	44
3.4 – CONCEITOS PARA O DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓ TIPOS.....	48
3.5 - MATERIAIS UTILIZADOS.....	50
3.5.1 - Sistema de Comunicação - Módulos RF <i>ZigBee</i>.	50
3.5.1.1 - Escolha da Tecnologia <i>ZigBee</i>	51
3.5.1.2 - Topologias de Rede <i>ZigBee</i>	51
3.5.2 - Conversor <i>GRID TIE</i>	53
3.5.2.1 - Procedimentos de Operação do Conversor <i>GRID TIE</i>	56
3.5.3 – Plataforma Arduino	57
3.5.4 – Sensor de corrente por efeito <i>Hall</i>	60
3.5.5 – Placa de Simulação INT700.....	62
3.5.6 – Medidor de Energia P4400	65
3.5.7 – Display LCD	67

3.5.8 - Painel solar	68
4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	70
4.1 – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DO MÉTODO DE CONTROLE COM PROTÓTIPO	70
4.1.1 – Protótipo do módulo de controle CC.....	70
4.1.2 – Detalhes construtivos do protótipo do módulo de controle CC	71
4.1.2.1 – Design computacional da placa eletrônica do módulo de controle CC.....	76
4.1.2.2 – Módulo de controle CC construído	80
4.1.4 – Protótipo do módulo coordenador.....	82
4.1.4.1 – Detalhes construtivos do protótipo do módulo coordenador.....	84
4.1.5 – Custo da construção dos protótipos.....	87
4.1.6 – Programação dos dispositivos <i>ZigBee XBee-PRO</i>	87
4.1.7 – Programação do Arduino UNO	92
4.2 - ENSAIO DOS PROTÓTIPOS E INSTALAÇÕES	95
4.2.1 – Instalação dos painéis e módulo de controle CC.....	95
4.2.2 – Ensaios do módulo de controle CC e do módulo coordenador	96
4.2.2.1 – Controle de estabilidade do nível de tensão e corrente de barra CC no ponto de conexão	99
4.2.3 – Ensaios do Conversor de Energia <i>GRID TIE</i>	102
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
APÊNDICE	119
A – ALGORITMO COMENTADO.....	120
B – COMPONENTES UTILIZADOS	125
C – DESENHO DA PLACA DE CONTROLE CC.....	128
ANEXOS	130
A – PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO <i>GRID TIE</i> SERIES.....	131
B - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS MEDIDOR.....	133
C - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS ANALIZADOR DE ENERGIA.....	134

1 – INTRODUÇÃO

Por meio da eletricidade transporta-se e distribui-se a energia de forma econômica e limpa, em comparação a outros métodos de transporte energético, tais como o carvão e óleo combustível. Seu transporte ocorre por meio de cabos elétricos e linhas de transmissão que, do ponto vista da segurança e economia, configura um meio estático de transporte. O transporte rodoviário e marítimo de petróleo, refinarias e extração de carvão facilita acidentes por falha humana e tem risco ambiental elevado (AZEVEDO, GIANLUPPI e MALAFAIA, 2007).

O incremento de geração de energia elétrica é uma forma de diminuir o consumo de combustíveis fósseis localmente. Desta forma, o uso de energia elétrica pode ser um aliado para o equilíbrio do ecossistema, desde que esta energia gerada venha de fontes renováveis. Este tipo de tecnologia valoriza os pequenos e micro aproveitamentos elétricos, e a instalação de painéis fotovoltaicos em residências, comércios e indústrias para consumo próprio, torna-se viável econômica e energeticamente (SHAYANI, 2010).

Quanto mais as fontes fósseis forem substituídas, por aproveitamentos que utilizem a eletricidade proveniente de fontes alternativas, seja para realizar trabalho, seja para outro fim a serviço da humanidade, maior será a contribuição para o meio ambiente e ecologia, com a redução da emissão de gases de efeito estufa (PEREIRA, 2004).

O que se espera, é que se desenvolva o aproveitamento da eletricidade de pequenos e micro gerações de fontes renováveis conectadas aos alimentadores radiais. Com a regulamentação do setor pela Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL, surge a permissão do micro gerador local utilizar o sistema elétrico como meio de troca, com o aproveitamento das fontes de energia disponíveis no local de consumo e os benefícios da estabilidade do sistema conectado – *SMART GRID* (ANEEL-AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2011).

A aplicação desta tendência local de micro geração demanda uma forma de conectar pequenas fontes elétricas, que podem ser de energia fotovoltaica, pequenos aerogeradores, células a combustível, etc... Em meio a estas demandas, o padrão estabelecido pelas

concessionárias de energia nas redes de distribuição, é o padrão a ser utilizado por estes novos empreendimentos, os atuais alimentadores radiais em baixa tensão podem aceitar empreendimentos para geração de até 500kW de potência instalada.

Uma limitação da eletricidade é a acumulação. Os acumuladores de energia ainda são insuficientes para a quantidade e demanda em nosso dia-a-dia. As soluções que promovam uma forma de armazená-la, de forma eficiente, é a chave para migração e sua aplicação em grande escala, o que propomos não é a utilização de uma nova bateria ou armazenador, mas sim a possibilidade de se utilizar as redes elétricas do sistema conectado já existentes de forma mais inteligente com a utilização de pequenos aproveitamentos que já atingiram a viabilidade econômica, para um aproveitamento melhor de todo o sistema.

Na prática, um pequeno produtor pode injetar o seu excedente no sistema conectado e acumular um bônus, e em outro momento utilizar estes bônus adquiridos. Isso é particularmente interessante para a geração de energia proveniente de fontes solares, pois a geração é apenas durante o dia e o consumo em uma residência concentra-se no período depois do anoitecer com a iluminação e outros. O sistema conectado inteligente-*SMART GRID*, com múltiplos usuários utilizando o sistema de distribuição da concessionária pode ser considerado um acumulador, não que a energia esteja sendo acumulada, mas sim compartilhada e comercializada (SEVERINO, 2008).

A geração distribuída fotovoltaica, com produção local e de alta disponibilidade pode ser comercializada para no sistema elétrico de distribuição, pois mesmo que o produtor de energia não a utilize num determinado momento pode injetar o excedente no sistema elétrico e outros consumidores a utilizarão. Apesar de ter produção limitada ao período de sol, é possível gerar energia a mais e injetar no sistema elétrico conectado e este excedente diurno, que pode compensar o custo da energia do período noturno, utilizando o medidor de quatro quadrantes que consegue aferir nos dois sentidos o fluxo da energia e medir o quanto foi injetado e o quanto foi consumido, permitindo ao consumidor um bônus que pode ser deduzido da fatura da energia no mês posterior (LANDISGYR, 2012).

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST, estabelecem todos os critérios técnicos para a conexão, gerenciamento e segurança destas instalações, solução para a conexão de qualidade, automática, gerenciada

e telecomandada das fontes fotovoltaicas. No PRODIST está prevista a criação de Centro de Despacho da Geração Distribuída-CDGD que deve monitorar e gerenciar à distância a conexão *SmartGrid*, de forma automática e independente e sem a necessidade de intervenção do consumidor.

No CDGD será feito todo o acompanhamento e gestão da geração distribuída, sendo necessária a troca de informações em tempo real entre a concessionária de energia e o consumidor para permitir o controle da geração e desconexão desta fonte de energia, para que isto seja possível, é necessário um meio de comunicação entre ambos, como a internet.

Um método de controle torna-se necessário para a geração distribuída de energia elétrica de grande penetração que pode ser estabelecido no controle de GD via algoritmo de controle, que interaja com a demanda de energia do sistema elétrico conectado, e que tenha sensores e métodos automáticos para a inserção da energia no sistema, onde possa inclusive colaborar para a correção e regulação de tensão em locais estratégicos como no final de alimentadores radiais.

Com o avanço da tecnologia eletro-eletrônica existe disponível no mercado conversores de energia com eficiências de até 98% e que podem ser conectados diretamente ao sistema de distribuição, é o conversor-*Grid TIE*, já instalado em pequena escala pelo mundo, mas é preciso ajustar os mercados e sistemas de energia para esta nova realidade, pois o sistema elétrico foi projetado para uma realidade onde o consumidor final não gera energia elétrica.

Com a soma de pequenas parcelas de Geração Distribuída-GD, desde que monitoradas com método eficiente de controle eletrônico, objeto de estudo deste trabalho, a tecnologia pode ser utilizada em grande escala. E configurar um aliado para a diminuição da utilização direta dos combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica, uma vez que viabiliza a utilização em escala de uma tecnologia alternativa como a energia solar e dos ventos.

A utilização de elemento inteligente permite a construção de algoritmos desenvolvidos para contornar falhas e realizar de forma ativa o monitoramento, para uma aplicação segura e eficiente do sistema GDFV. Utilizando interfaces microcontroladas de qualidade e de fácil reprodução, com um sistema de comunicação que atenda normas de segurança do

protocolo IEEE:802.15.4, pode ser gerado um código criptografado que garanta a segurança da comunicação remota (ALBACORE, 2012).

Muitas vezes para o consumidor comercial e industrial, o aumento de consumo ocorre ao mesmo tempo em que ocorrem novos investimentos, é possível calcular, nestes novos investimentos a parcela de painéis que compensará o acréscimo de consumo de energia previsto na expansão (ANEEL, 2012). Há possibilidade de instalar novos painéis fotovoltaicos para complementar a planta instalada de um determinado consumidor de acordo com o aumento de consumo, mantendo, desta forma o seu consumo anterior. Por exemplo, se é preciso instalar um ar condicionado a mais em um determinado comércio, isto implicaria em aumento de consumo, mas se junto com o equipamento, instala-se também painéis solares de mesma capacidade, pode-se dizer que o saldo é nulo em relação a este equipamento novo instalado e a conta permanece no valor anterior, o que se faz é investir mais em equipamentos e ganhar na diferença, sendo ao saldo positivo quando o equipamento se pagar com a economia alcançada na fatura de energia elétrica.

O consumidor pode inclusive reduzir os seus gastos com energia elétrica reduzindo gradualmente o consumo, e pode escolher, via investimentos em energia fotovoltaica - FV, escolhendo em que faixa de consumo deseja ficar, evitando novos enquadramentos do Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviço-ICMS por faixa de consumo cuja tributação é aumentada percentualmente de acordo com o consumo, que vigora na conta do consumidor final.

Considerando as diversas fontes de energias disponíveis ao consumidor de acordo com o meio ambiente que o cerca, o desafio é permitir que diferentes fontes sejam conectadas entre si, e com diferentes regimes de funcionamento, painéis fotovoltaicos, geradores eólicos ou células de combustível. Trata-se de GD, que é bem diferente da utilização em forma de sistema isolado com banco de baterias, onde a eficiência da conversão é muito mais baixa, com aproveitamento de 55%. Utilizar as pequenas fontes conectadas à rede da concessionária de energia elétrica, utilizando como referência de operação permite grande aplicabilidade ao novo conceito de conexão. O sistema não ameaça a concessão ou os métodos de controles em uso atualmente, mas abre a possibilidade de postergar investimentos massivos em novos equipamentos para os problemas elétricos relacionados a conexão de cargas ao final dos alimentadores radiais permitindo também ajustes nos

parâmetros de cálculo de Linhas de Transmissão, podendo em alguns casos substituir o tradicional capacitor por painéis que podem elevar o nível de tensão fornecendo energia reativa e também energia ativa (SHAYANI, 2006). Trata-se não somente de um incremento acessório, onde novos conceitos são implantados no sentido de promover um melhor uso das energias disponíveis no ponto de consumo, com a participação do consumidor final.

Existe a possibilidade de estudos que viabilizem substituição dos atuais capacitores geradores de reativos por painéis solares fotovoltaicos, onde o alimentador demanda por carga reativa de complementação, contribuindo para a estabilidade do sistema elétrico, com a correção do fator de potência (LIU e BEBIC, 2008).

O painel fotovoltaico já é ofertado por fabricantes chineses a US\$ 0.55 - 0.85 por Watt¹, onde a energia fotovoltaica se torna competitiva evidenciando a grande demanda por este aproveitamento, surge naturalmente a necessidade de desenvolver o método de controle proposto neste trabalho.

As tecnologias necessárias para o método de conexão e controle são discutidas nos capítulos seguintes. Construiu-se um protótipo que gerencia o processo de geração à distância, permitindo colher informações em tempo real dos detalhes técnicos, os níveis das variáveis de energia e comandar de forma automática ou programada o acionamento destas fontes de geração.

Estudos complementares podem ser adequados às soluções aqui propostas, para outras pequenas fontes de eletricidade, como aerogeradores e bancos de baterias, uma vez que a maioria dos aproveitamentos locais, tem uma produção de energia em corrente contínua e com valores próximos aos utilizados no presente estudo na faixa de 10,5 a 28Vdc (ANEEL, 2011).

¹ Custo do painel fotovoltaico. Shandong Hilight-Solar Co., Ltd. (SHANDONG HILIGHT-SOLAR CO., LTD., 2012)

1.1 – ESTRUTURAS DO TEXTO

A situação energética atual do Brasil é estudada na revisão bibliográfica com sugestões e possível inserção da energia fotovoltaica e eólica em grande escala, descreve-se que esta tecnologia tem uma tendência natural de trazer economia para os consumidores finais de energia, onde os mesmos já têm à disposição equipamentos para injetar energia fotovoltaica na rede elétrica e esta prática está se tornando viável economicamente. Estudos prévios para entender a importância de se projetar de forma que viabilize um método de controle para este meio de geração, garantindo e realizando a gestão do sistema de geração conectado (*SMART GRID*), para a realidade brasileira.

Em materiais e métodos, apresentam-se as tecnologias necessárias empregadas no desenvolvimento do algoritmo que resolve a questão do controle e segurança da conexão de um sistema fotovoltaico de grande penetração, com controle de geração e sensores (SHAYANI, 2010).

Resultados e análise discorrem sobre os ensaios realizados com o protótipo, a concepção do circuito, os detalhes construtivos e a documentação técnica do analisador de energia utilizado para as medições.

O algoritmo de controle detalhado e a lista de componentes necessários ao desenvolvimento do protótipo, com o layout da placa de circuito impresso são apresentados nos apêndices.

Nos anexos apresentamos as informações técnicas do analisador de energia e demais equipamentos relevantes que utilizamos.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as questões motivadoras para o presente desenvolvimento do método de controle de injeção de potência de painéis fotovoltaicos conectados a alimentadores radiais de distribuição. Aborda-se a necessidade de um sistema de controle para este tipo de geração, a escolha da tecnologia adotada para a solução do módulo de controle CC², verifica-se também um levantamento do estado da arte atual nos sistemas de controle adotados para a solução de sistemas similares.

2.1 - MOTIVAÇÕES DO PRESENTE ESTUDO

2.1.1 - A energia e o homem

Considera-se que o ser humano, na busca pelo aprimoramento e desenvolvimento de melhorias para a sua qualidade de vida, utiliza métodos cada vez mais dependentes de um aporte energético maior, pois o nível de desenvolvimento de uma sociedade pode ser medido em quantidades de Unidade Térmica Britânica – BTU por habitante (IEA, 2011).

Fica evidente a crescente demanda por energia, entre elas, o grau de consumo de energia elétrica indica o quanto uma sociedade é desenvolvida, Quadro 2.1, (GOLDEMBERG, 1998).

Quadro 2.1 - *Quantidade de BTU/HAB/DIA do Brasil (Unidade Britânica).*

Ano	Btu (Quadrilhões)	Habitantes (Bilhões)	Btu/Hab	Btu/Hab/dia
2004	444,4	6,393	69,51	190 mil
2005	457,7	6,469	70,75	193 mil
2006	467,2	6,545	71,38	195 mil
2007	475,1	6,623	71,73	196 mil
2008	491,4	6,700	73,34	200 mil

Fonte: EIA-US. *Energy Information Administration*, 2010. Disponível em: <<http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm>>. Acesso em: 21 mar. 2010.

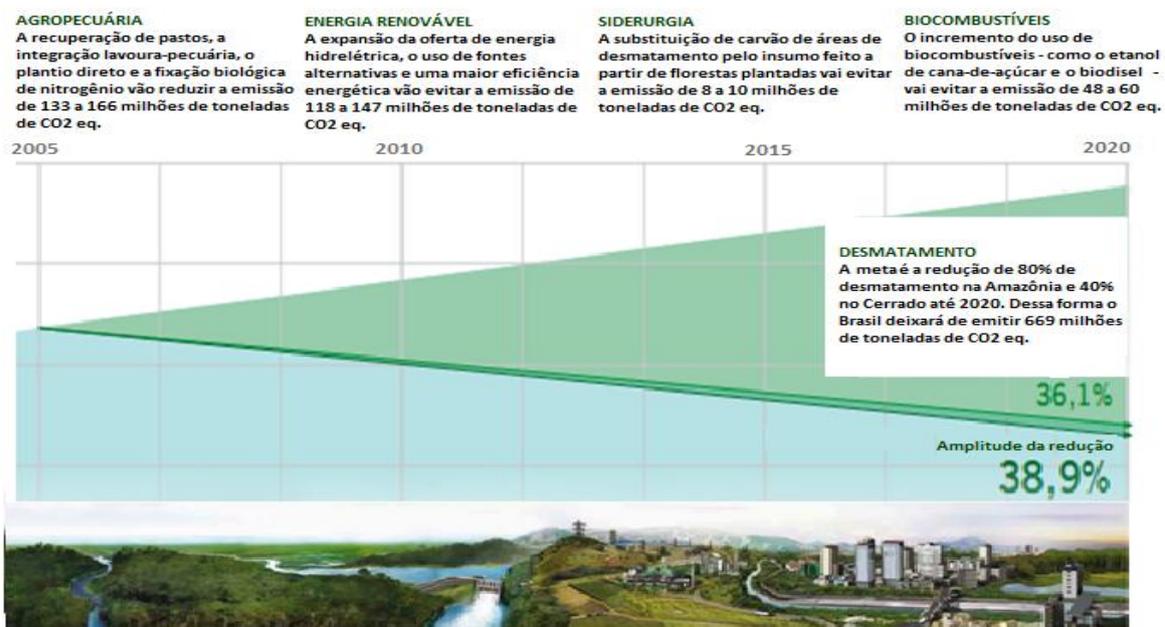
² Modalidade de conversor de energia que não altera o tipo de sinal, apenas atua no sentido de controlar suas grandezas.

2.1.2 - Fontes de energia e emissão de CO²

O Sol é o grande responsável pela vida na Terra, pois a biomassa e toda a cadeia de hidrocarbonetos³ são provenientes do fenômeno da fotossíntese, inclusive o petróleo e seus derivados, portanto a gasolina de hoje é a biomassa do passado, soterrada e transformada ao longo dos séculos, sendo uma forma de combustível fóssil e escasso (MATTOSSO, 2006).

Além disso, é sabido que as fontes renováveis geralmente são efeitos secundários da irradiação solar, como eólicas, maré, hidráulica, termossolar e finalmente a energia fotovoltaica que, dentre todas, é a única que converte diretamente irradiação solar em eletricidade. Outra grande vantagem do uso da energia fotovoltaica é a sua disponibilidade geográfica, que abrange boa parte do globo.

A grande maioria dos países no mundo já se conscientizou da necessidade de controlar as emissões de poluentes. Na 15^a Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima-COP15⁴, o Brasil assumiu o compromisso de redução de 38,9% na emissão de poluentes até 2020, Figura 2.1.



³ Os hidrocarbonetos naturais são compostos químicos constituídos apenas por átomos de carbono (C) e de hidrogênio (H), aos quais se podem juntar átomos de oxigênio (O), azoto ou nitrogênio (N) e enxofre (S) dando origem a diferentes compostos de outros grupos funcionais (WIKIPÉDIA, 2012).

⁴ Teve como principal resultado o “Acordo de Copenhague” (BRASIL, 2009).

Fonte: BRASIL. Compromissos do Brasil com a COP15. **Acordo de Genebra**, 2009. Disponível em: <<http://www.cop15brasil.gov.br>>. Acesso em: 23 Abril 2011.

Figura 2.1 - *Compromissos do Brasil para redução de gases de efeito estufa CO₂* (Modificado).

No cenário mundial os principais poluidores são apresentados no Quadro 2.2, onde mostra que os países continuam dando saltos de emissão de CO₂ anualmente. O contrassenso, é que para que os países permaneçam com suas economias aquecidas, é preciso aumentar sempre a produção de riquezas no país. Estas riquezas são bens de consumo retirados na natureza e colocados a serviço da humanidade. O homem pode começar a agregar valor em produtos de forma menos danosa e lesiva ao meio ambiente, por meio de políticas públicas e da iniciativa privada em campanhas de eficiência e reciclagem, que já somam esforços no sentido de proibir certas práticas e usos de produtos extremamente danosos como no caso de defensivos e produtos tóxicos (LEI N° 6.938, de 31 de agosto de 1981), (IBAMA, 1981).

Quadro 2.2 - *Emissões totais de CO₂ no BRICS**.

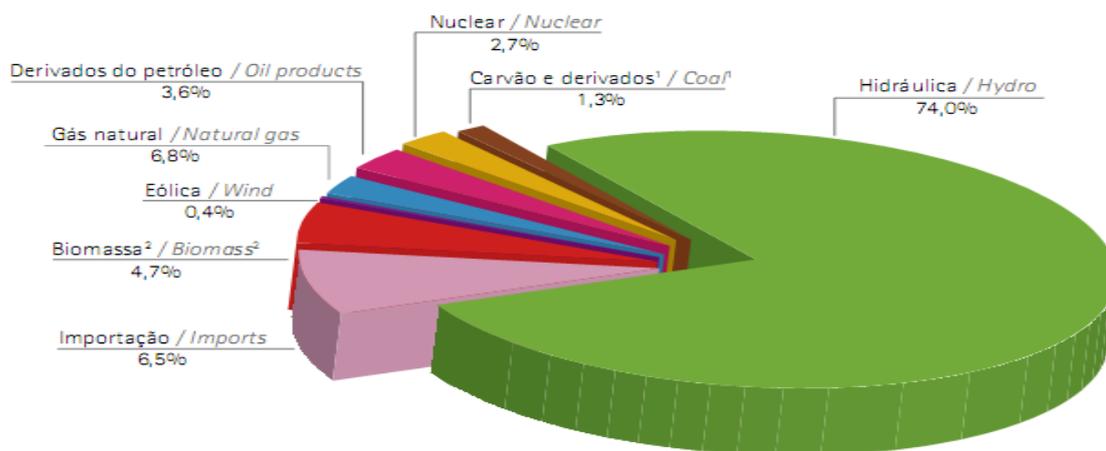
	2004	2005	2006	2007	2008
China	5.131,85	5.558,48	5.861,96	6.246,55	6.533,55
Rússia	1.643,46	1.635,55	1.679,63	1.649,27	1.729,38
Índia	1.131,57	1.189,10	1.288,91	1.385,74	1.494,88
Brasil	356,17	370,46	383,53	397,12	428,17
Para a comparação com os EUA abaixo:					
*United States	5.965,32	5.988,14	5.908,46	6.003,26	5.832,82

* Em comparativo com as emissões de CO₂ dos Estados Unidos nos mesmos anos, considerando todas as fontes.

Fonte: IEA. *International Energy Agency. Key Word Energy Statistics*, Paris, p. 80, 2011. Disponível em: <[www.iea.org<http://www.iea.org/textbase/npdf/free/2010/key_stats_2010.pdf](http://www.iea.org/textbase/npdf/free/2010/key_stats_2010.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2011.

O Brasil é ímpar entre os países em desenvolvimento (BRICS), quando se trata de emissão de CO₂ (MME e EPE, 2011). Posicionando-se como exemplo mundial, o Brasil possui 74% da energia elétrica nacional de origem hidráulica no Gráfico 2.1.

Outro grande trunfo do Brasil na utilização fontes energéticas renováveis é o uso de álcool como combustível que possui saldo neutro em relação à emissão de gases de efeito estufa (UNICA, 2011).

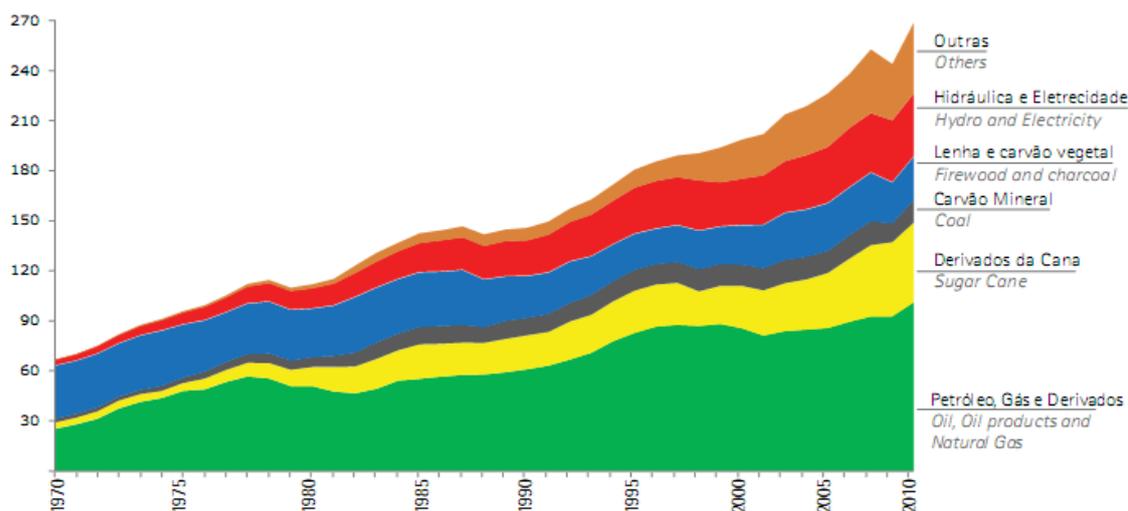


Fonte: MME. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional - BEN, subsidia o planejamento do setor energético**, Brasília, p. 52, 2011. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

Gráfico 2.1 - *Oferta interna de energia elétrica por fonte 2010* (Modificado).

Entre os países do BRICS o Brasil é o único que emite uma quantidade reduzida de CO₂, mas esta realidade está mudando rapidamente quando o consumo de combustíveis fósseis aumenta conforme tendência no Gráfico 2.2.

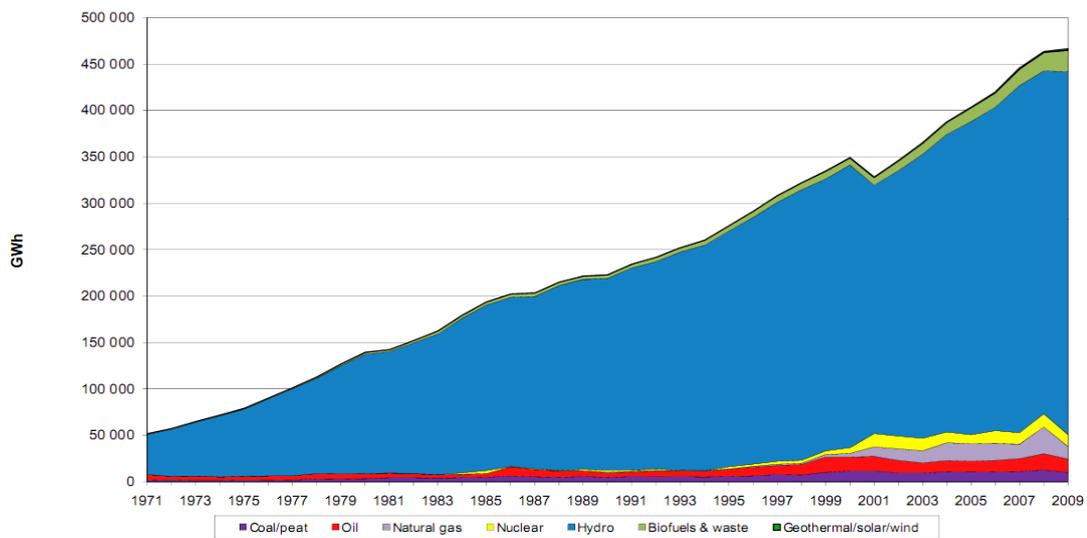
[10⁶ tep]



Fonte: MME. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional - BEN, subsidia o planejamento do setor energético**, Brasília, p. 52, 2011. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

Gráfico 2.2 - *Oferta interna de energia no Brasil*.

Como a energia elétrica proveniente de usinas hidráulicas exige investimentos com retorno do capital em longo prazo, foram construídos empreendimentos térmicos com retorno do investimento quase imediato que ficam de prontidão para suprir os picos de consumo ou a falta de chuvas quando os reservatórios das hidrelétricas estão baixos, observando este cenário onde a demanda por energia elétrica cresce a uma taxa de 4,8% nos próximos 10 anos (EPE, 2011), há necessidade de o Brasil diversificar sua geração de energia elétrica, Gráfico 2.3.



Fonte: IEA. *International Energy Agency. Key Word Energy Statistics*, Paris, p. 80, 2011. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2011.

Gráfico 2.3 - *Geração de energia por tipo de combustível no Brasil.*

A bibliografia internacional cita o Brasil como um exemplo em geração com hidrelétricas, pois 74% de sua eletricidade provêm de fonte hidráulica, sendo superado pela Noruega, com 95,7% (IEA, 2011). A fonte hidráulica de eletricidade é renovável, devido ao ciclo das chuvas, mas acontece que durante a construção de novos reservatórios ocorre a perda de terra agricultável. Um dos problemas dos novos reservatórios é que geralmente, submerge grandes quantidades de matéria orgânica, o que libera concentrações de CO₂ significativas que tornam a água ácida.

Além deste inconveniente, os melhores aproveitamentos elétricos, onde o custo benefício e o fator de carga (energia firme), que justificam a construção da obra, já foram aproveitados, restando agora os aproveitamentos mais onerosos de se construir e que impactam muito o ambiente (GOTA D'ÁGUA, 2012).

2.1.3 - Aproveitamentos fotovoltaicos e GD

A projeção do aumento do consumo brasileiro de energia para os próximos anos pode ser observada na Tabela 2.1 (MME e EPE, 2011). Os investimentos fotovoltaicos podem contribuir para as novas demandas que estão surgindo, e se tornar uma das soluções para as sempre crescentes demandas de novas fontes de geração de energia.

Tabela 2.1 - *Elasticidade - renda do consumo de energia elétrica* (Modificado).

ANO	Consumo ⁽¹⁾ (Twh)	PIB (10 ⁹ R\$ 2008)	Intensidade (kWh/R\$ 2008)
2010	455,2	3.201	0,142
2014	561,8	3.891	0,144
2019	712,0	4.966	0,143
Período	Variação (% a.a.) *	Variação (% a.a.) *	Elasticidade
2010-2014	5,8	5,2	1,11
2015-2019	4,9	5,0	0,97
2010-2019	5,3	5,1	1,04

* Variações médias anuais nos períodos indicados, a partir de 2009 e 2014.

Fonte: MME/EPE. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia, 2020**, Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf>. Acesso em: 23 maio 2012.

Devido às vantagens construtivas e proximidade com o centro de carga (centro de consumo), o investimento em GD utilizando fontes renováveis de energia, configura um investimento que vem a contribuir para expandir a geração no Brasil, possibilitando inclusive uma menor quantidade de queima de combustíveis fósseis para geração de energia, com o não acionamento das usinas térmicas que ficam de sobreaviso caso aja demanda em momentos onde os picos de consumo ou a ocorrência de pouca água nos reservatórios das usinas hidrelétricas (ZWERBEL, MASON e FTHENAKIS, 2004).

Assim, sugere-se a manutenção da vocação brasileira com energias renováveis, para que fontes como GDFV e eólicas sejam estimuladas para a expansão do sistema elétrico brasileiro. Novas propostas foram discutidas na reunião RIO+20, novos conceitos como economia verde e estrutura institucional para o desenvolvimento sustentável sugerem novidades, mas o que fica evidente é que o mundo caminha para métodos e processos mais verdes (RIO+20, 2012).

Com a estimativa de variação de consumo a taxas superiores a 5%, são necessários novos investimentos no setor elétrico ano a ano, uma parte deste investimento poderá ser em energia fotovoltaica (ARAUJO, 2011).

A empresa MPX⁵, do empresário Eike Batista, conectou ao sistema elétrico nacional a primeira usina de geração de energia solar em escala comercial do Brasil, a MPX Tauá, no sertão do Ceará. A usina tem capacidade instalada inicial de 1 MW, o suficiente para abastecer 1,5 mil famílias e projeção de chegar a 50MW de potência instalada (BRANKERA, PATHAKA e PEARCEA, 2011). Com 4.680 painéis fotovoltaicos de alto desempenho, a planta recebeu investimentos totais de cerca de R\$ 10 milhões (MPX GRUPO EBX, 2012), Figura 2.2.



⁵MPX – Empresa de energia do Grupo EBX, com atuação nas áreas de **exploração e comercialização de recursos naturais** (carvão e gás natural), **logística** para movimentação desses combustíveis, **geração e comercialização** (MPX - GRUPO EBX, 2011).

Fonte: MPX, GRUPO EBX. Solar Tauá - Primeira usina solar brasileira. **O empreendimento localizado no Ceará tem potência suficiente para suprir de energia 1,5 mil residências**, 2012. Disponível em: <<http://www.mpx.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/usinas-em-operacao/Paginas/solar-taua.aspx>>. Acesso em: 03 abr 2012.

Figura 2.2 - Instalações da MPX, TAUÁ, primeira usina solar brasileira.

Com o uso de energia fotovoltaica distribuída, Figura 2.3, é possível cogeração com a energia fotovoltaica disponível durante o dia, em certos bairros comerciais, que começam suas atividades às 8 horas, e com encerramento às 18hs, justamente no período de incidência solar. Esta complementação é interessante uma vez que os aparelhos de ar condicionado são ligados justamente para refrigerar o ambiente que se aquece devido ao calor provocado em parte, pela irradiação solar externa.

Uma interessante proposta para a maximização do espaço e conveniência na instalação dos painéis fotovoltaicos é a fixação em postes como exemplo da concessionária de *New Jersey* (PSE&G'S, 2012).



Fonte: PSE&G'S. *Solar 4 All TM Program. The PSE&G Solar 4 All™ program will add 80 megawatts (MW) of solar electric generation capacity to the PSE&G electrical system by the end of 2012*, 2012. Disponível em: <<http://www.pseg.com/family/pseandg/solar4all/index.jsp>>. Acesso em: 03 abr. 2012.

Figura 2.3 - *Aproveitamento fotovoltaico utilizando poste de distribuição pela PSE&G.*

Os aproveitamentos fotovoltaicos em postes podem ser utilizados pela concessionária como um aumento de rendimento do sistema elétrico na planta do local, devido às suas características elétricas, podendo fornecer energia ativa ou reativa, de acordo com o conversor de energia. Um grande incentivo deste tipo de utilização fotovoltaica conectada, é que sem o banco de baterias do sistema fotovoltaico isolado o rendimento sai de aproximadamente 70% para 93% de rendimento na conversão, utilizando-se conversores *GRID TIE* (SHAYANI, 2006).

Com este tipo de geração, pode-se atender às regiões do país onde o pico de consumo se localiza no período de maior insolação.

Entende-se que, para o consumidor final, a energia Fotovoltaica-FV pode representar vantagem de longo prazo devido ao custo do painel que está em queda historicamente e com desenvolvimento de novas tecnologias que podem baixar o custo de produção pela metade, como nova combinação de células solares compactas com lentes de Fresnel (SNOWPEAK ENERGY, 2012). Surge no país a companhia Brasileira de Semicondutores-CBS, financiada pelo Banco Nacional do Desenvolvimento-BNDES em novo empreendimento do empresário Eike Batista e Wolfgang Sauer, em Ribeirão das Neves-MG, com isso o Brasil entra no circuito internacional de produtor de semicondutores e conseqüentemente sinaliza forte baixa no curso do painel solar para o consumidor em território nacional (ISTO É DINHERO, 2012).

Sobre o custo da energia fornecida ao consumidor pela concessionária distribuidora de energia, incidem todos os custos do sistema elétrico brasileiro. Devido aos novos investimentos por parte do governo e da iniciativa privada para o crescimento do país, (MPX - GRUPO EBX, 2011) e demandas crescentes do consumo por parte da população que está consumindo mais com a nova classe média (IBGE, 2003), a demanda por novas fontes cresce exponencialmente, e o sistema elétrico brasileiro cresce a uma taxa de aproximadamente 5% a.a. (MME e EPE, 2011).

Uma importante referência histórica para a economia mundial é o preço do barril de petróleo, uma vez que ainda tem-se uma economia altamente dependente deste tipo de

combustível, o aumento do preço nos últimos anos deve continuar o que viabiliza a energia FV, pois a energia fóssil tende a ficar mais cara. Na Tabela 2.2, observa-se a elevação do custo do Barril de Petróleo de Referência Internacional-BRENT.

Tabela 2.2 - *Evolução do preço do petróleo tipo Brent.*

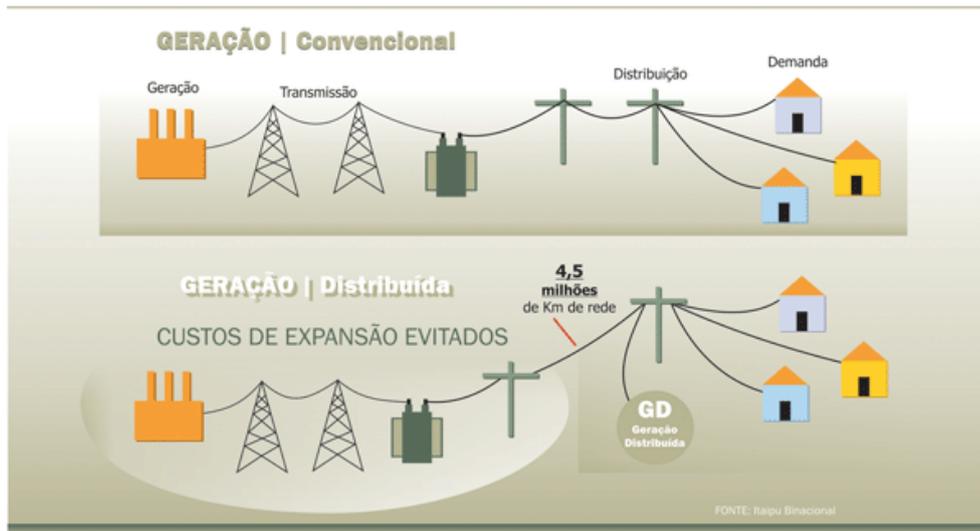
Indicadores Econômicos	Histórico		Projeção	
	1999 - 2003	2004 - 2008	2010 - 2014	2015 - 2019
Preço do petróleo tipo Brent (U\$ maio2008/barril)	32,69	73,01	82,79	91,36

Fonte: MME/EPE. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia, 2020**, Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf>. Acesso em: 23 maio 2012.

Em um sistema convencional de geração de energia, têm-se geradores de energia geralmente distantes dos grandes centros de consumo, em grandes aproveitamentos como hidrelétricas no caso do Brasil.

Para que a energia chegue a estes grandes centros, configurou-se ao longo das expansões históricas do sistema elétrico nacional uma grande rede de transmissão que se estende por todo o país. Quando a linha de transmissão chega às cidades, é necessário um adequamento do nível de tensão para que seja feita a distribuição local da energia, passando por centrais de energia chamadas subestações. As subestações distribuem a energia pelos bairros por alimentadores radiais típicos de 13,8kVac. Os alimentadores radiais, Figura 2.4, podem transportar uma potência grande de energia, pode-se chegar a 10MVA, portanto plugados a estes alimentadores tem-se transformadores abaixadores em postes que atendem um conjunto de casas, ou no caso de grandes consumidores, atendem ao estabelecimento comercial e indústrias diretamente com um posto de transformação.

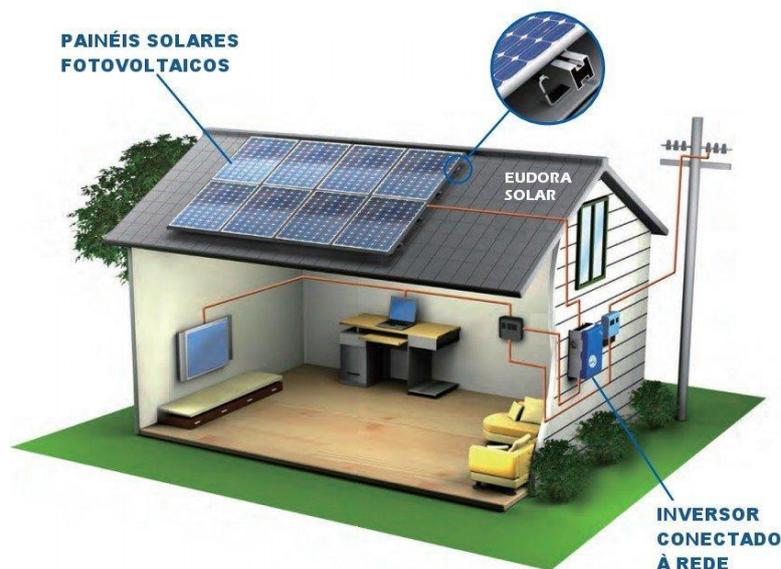
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA - METODOLOGIA OPERACIONAL



Fonte: INTELIGENTE, R. Rede Inteligente. **Aneel aposta nas redes inteligentes para melhoria da qualidade do serviço de distribuição**, 2012. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2012/08/10/aneel-aposta-nas-redes-inteligentes-para-melhoria-da-qualidade-do-servico-de-distribuicao/>>. Acesso em: 10 ago. 2012.

Figura 2.4 - Alimentadores radiais de distribuição 13,8 kVac.

Com a GDFV, pode-se suplementar as necessidades diárias principalmente dos grandes consumidores, que geralmente tem suas atividades principais no período de sol, gerando economia (INTELIGENTE, 2012). Com uma topologia como a da Figura 2.5, começa a existir uma GD interna à planta do consumidor, e assim a energia firme é a da concessionária de energia que sustenta automaticamente nos momentos de ausência de geração (EUDORA SOLAR, 2012).



Fonte: EUDORA SOLAR. Fornecedores de serviço e equipamentos acesso a tecnologia pelo grande público. **Sua casa sustentável:** energia elétrica limpa e sustentável, 2012. Disponível em: <http://www.eudorasolar.com.br/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=18>. Acesso em: 10 jun. 2012.

Figura 2.5 - Imóvel com Geração Distribuída.

Como o consumidor arca com o custo da transmissão da energia e distribuição, conforme Quadro 2.3, o kWh (Energia) chega ao consumidor final a um preço elevado.

Quadro 2.3 - Composição da tarifa de energia.

Receita do Serviço de Distribuição	
Custo não gerenciável – Parcela A	Custo gerenciável – Parcela B
Compra de energia	Custos operacionais
Transmissão	Cota de depreciação
Encargos setoriais	Remuneração dos investimentos
Tarifa de Energia = Parcela A + Parcela B	

Fonte: ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa nº 395/2009. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST:** Cartilha de Acesso ao Sistema de Distribuição, Brasília, p. 75, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha_revisao_1.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2011.

Na Tabela 2.3 tem-se o histórico dos últimos reajustes praticados pelas concessionárias de energia apresentados pela ANEEL.

Tabela 2.3 - Reajustes praticados pelas concessionárias de energia.

Correção da tarifa de energia elétrica decorrente da revisão tarifária periódica Primeiro ciclo (2003/2005) – empresas selecionadas			
Empresas/Região	Correção Tarifária em Decorrência da Revisão (Em %)		
	2003	2004	2005
Sudeste:			
Cemig	31,53		
CPFL	19,55		
Bandeirante	18,08		
Light	4,15		
CERJ(atual Ampla)	15,22		
Eletropaulo	10,95		
Escelsa*		19,89	
Sul:			
RGE	27,36		
AES Sul	16,14		
CEEE		6,46	
Celesc		9,37	
Copel		14,43	
Nordeste:			
Energipe	31,18		
Cosern	11,49		
Coelse	31,29		
Coelba	31,49		
Celpe			24,43
Norte:			
Celipa	27,06		
Celtins	14,64		
Manaus Energia			19,07
Eletoacre			3,79
Ceron			5,42
Centro Oeste:			
Cemat	26,00		
Enersul	36,59		

Nota: (*) Na Escelsa esse foi o segundo ciclo de revisão.

Fonte: ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa nº 395/2009. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST:** Cartilha de Acesso ao Sistema de Distribuição, Brasília, p. 75, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha_revisao_1.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2011.

Com o exposto na Tabela 2.3, pode perceber que a tendência é muito forte de aumentos na tarifa de energia, uma vez que o governo precisa investir mais em energia e estes investimentos são repassados ao consumidor através da tarifa, além de outros encargos.

O custo da geração fotovoltaica é calculado como amortização do investimento na instalação dos equipamentos ao longo de sua vida útil, neste caso como a geração é feita no terreno do consumidor local, considera-se o custo de instalação e outras taxas referentes ao contrato com a concessionária podem ser amortizados, pois a vida útil do painel fotovoltaico é estimada em 30 anos, e conversores em 5 anos.

O valor pago pela energia no consumidor final equivalerá ao do custo de instalação da GDFV num futuro próximo, tendendo a ficar mais barata que a energia fornecida pela concessionária nos próximos anos (SHAYANI, 2006).

As perdas de energia elétrica no processo de distribuição e transmissão também são pagas pelo consumidor final. É um encargo que se paga por estar distante das fontes geradoras. Na Tabela 2.4, tem-se a previsão de incremento deste índice de perdas para os próximos anos.

Tabela 2.4 - Sistema nacional interligado e subsistemas: Índice de perdas na transmissão de energia elétrica (%).

Ano	Subsistema perdas em %				
	Norte	Nordeste	Sudeste/CO	Sul	SIN
2010	16,7	18,3	16,1	11,8	15,7
2014	20,0	17,7	15,8	11,7	15,8
2019	19,5	17,1	15,4	11,7	15,5

Nota: Foi considerada a interligação dos sistemas isolados Acre/Rondônia ao subsistema Sudeste/CO a partir de novembro de 2009, e a interligação dos sistemas isolados Manaus/Macapá/margem esquerda do Amazonas ao subsistema Norte a partir de novembro de 2011.

Fonte: MME/EPE. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia, 2020**, Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf>. Acesso em: 23 maio 2012.

Em um sistema interligado, qualquer alteração da malha conectada deve ser informada ao ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. O ONS regula a geração de todo o país. Cálculos de fluxo de potência precisam ser realizados e novas estratégias para o atendimento dos mercados são implementadas. A GDFV não será diferente, deve ser

desenvolvida levando-se em consideração a complementação às demandas e necessidades do sistema interligado nacional. Uma aplicação é a suplementação dos alimentadores radiais em pontos importantes do sistema, onde se tem um consumo elevado em final de linha durante o período diurno, podendo atuar diretamente no subsistema, pois a energia fotovoltaica está disponível em qualquer posição geográfica do Brasil.

Em alimentadores radiais, responsáveis pelo atendimento de cargas indutivas (motores pesados) de grandes consumidores que podem se beneficiar devido à necessidade de energia reativa nestes alimentadores, pois o conversor de energia CC-CA pode variar o fator de potência se for construído com esta finalidade, e tem a possibilidade de reequilibrar o triângulo do fator de potência diretamente na rede do motor indutivo por meio de incremento de potência reativa capacitiva, mitigando a necessidade de bancos de capacitores ou até mesmo substituí-los completamente, se os motores operam diurnamente no período de sol.

Com este entendimento, pode-se afirmar que o investimento em GDFV melhorará os índices de perdas das redes de distribuição, pois a geração se dá dentro do terreno do consumidor na baixa tensão, e assim, evitam-se custos e perdas.

Em algumas cidades brasileiras em períodos de grande incidência solar, temos a possibilidade de aproveitar esta grande quantidade de energia com o uso do painel conectado ao sistema elétrico. O painel tem eficiência máxima justamente no momento de maior demanda de energia pelo aparelho de ar condicionado.

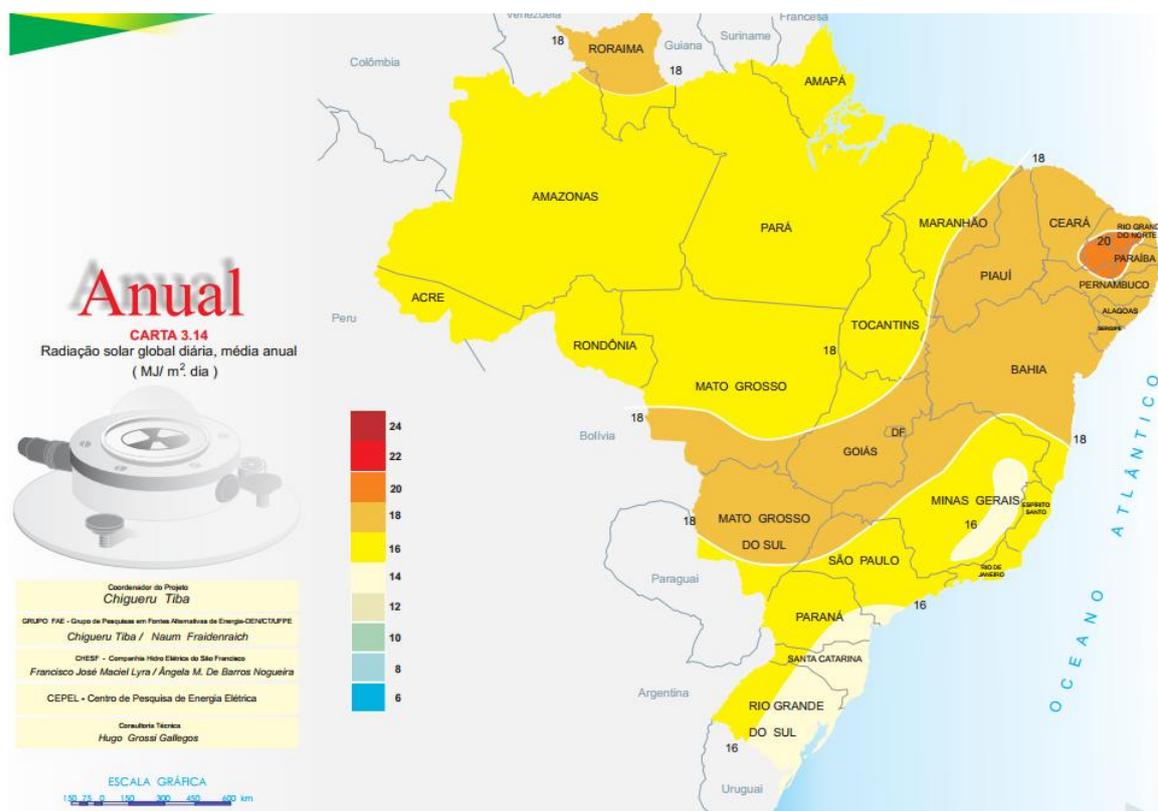
Investimentos pequenos no centro de carga podem fazer a diferença se forem utilizados para reduzir o pico de consumo em horário de ponta. Agindo desta forma, com uma política de incentivo da GDFV, podem-se evitar grandes investimentos de longo prazo e mitigação de riscos, como a readequação de subestações de energia e possível substituição de caros transformadores e outros equipamentos.

Com políticas simples, onde o próprio consumidor pode investir no sistema elétrico, o aumento e ganho de confiabilidade nos centros de carga pode ser incentivado com um novo modelo de gestão, o texto aprovado pela Aneel na Regulamentação Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012, expõe que para a conexão de GD é necessário um centro de

gestão da GDFV (ANEEL, 2012), desta forma o trabalho que se segue, prevê uma solução de controle local automático para fazer essa gestão técnica da GD, que influencia o sistema elétrico para um ganho maior de estabilidade, evitando sobrecargas no sistema elétrico de distribuição, e considera todos os incrementos de geração disponíveis podendo aumentar a performance do mesmo.

Outra grande vantagem da Microgeração⁶ é a sua rapidez de instalação, no caso de GDFV um parque de painéis pode ser montado em pouco tempo, é só o tempo da instalação dos painéis e equipamentos (ABREU, OLIVEIRA e GUERRA, 2010).

No Brasil, Figura 2.6, a radiação solar está disponível com 14 a 22 MJ/m².dia de aproveitamento de acordo com a latitude, portanto este potencial não pode ser desprezado. Estima-se que a energia solar incidente sobre a superfície terrestre seja da ordem de 10 mil vezes o consumo energético mundial (TIBA, 2000).



Fonte: TIBA, C. **Atlas solarimétrico do Brasil:** Banco de dados solarimétricos. 2. ed. Recife: UFPE, 2000.

⁶ A microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com alternativas, de energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. (ANEEL, 2012)

Figura 2.6 - *Mapa Solarimétrico Brasileiro Radiação Solar Global.*

Outra forma de incentivar o desenvolvimento da GDFV é a análise das propostas contidas no Projeto de Lei 630/2003, elaborada pelo Deputado Roberto Gouveia, que se encontra no Congresso Nacional à espera de votação. Neste, estão bem alicerçadas as bases de uma correta implantação de políticas públicas que favorecem a microgeração no país (GOUVEIA, 2003). Este projeto também prevê a participação do consumidor residencial no processo de geração de energia, e constitui fundo especial para financiar pesquisas e fomentar a produção de energia elétrica e térmica a partir da energia solar e eólica.

A Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL, estabelece a necessidade de um medidor para mensurar a energia entrante no sistema elétrico nacional por parte dos consumidores, proveniente de GDFV e aero geradores (ANEEL, 2012). Tem aumentado o número de empresas no Brasil que fornecem ao consumidor residencial a instalação de tais equipamentos⁷.

2.1.4 - Economia verde: novas possibilidades para energia fotovoltaica.

Tem surgido de todas as partes do mundo mobilizações a favor de uma economia verde, onde certos investimentos não são mais viáveis economicamente quando se leva em consideração os custos de reparação do meio ambiente ou o tratamento dos efluentes, como no caso da galvanoplastia com cromo. Formas de contornar o problema, que anteriormente produzia resíduos tóxicos, são novos métodos como a cromação por vaporização e tintas especiais que promovem o efeito de cromação sem a liberação de grandes quantidades de resíduos (ALQUIMIA MODERNA, 2012)

Tem-se que economia de baixo carbono, ou economia verde, já está se tornando comum e tem por objetivo o desenvolvimento de uma modelo que leve em consideração uma nova forma competitiva e adaptada aos novos desafios exigidos pela crise financeira internacional e pelas mudanças climáticas que já ocorrem por todo o planeta (SÃO PAULO, 2012). No estudo: “*Economia Verde: desenvolvimento, meio ambiente e qualidade de vida no Estado de São Paulo*”, desenvolvido pela Secretaria do Meio

⁷ ANEEL abre audiência para definir novo padrão de medidor de energia (ANEEL, 2010)

Ambiente / Coordenadoria de Planejamento Ambiental do Estado de São Paulo, consta prospecções em relação ao incentivo da construção de uma cadeia nacional para a produção de células solares no Brasil, afirmam que o estado de São Paulo é o maior produtor de silício com grau de pureza de 99%, e que há potenciais enormes nos estados já produtores, como BA, GO, ES, que podem mudar o mercado nacional e internacional. Se políticas forem tomadas para a construção de uma cadeia produtiva que começa na jazida, para atingir a quantidade e qualidade necessária com 99,9999% puro do Silício de Grau Solar-SiGS. O SiGS não é produzido no Brasil e com a crise da oferta em 2007, chegou no *spot market* (Compra imediata), a patamares de US\$ 400/Kg⁴. Atualmente encontra-se em retração de 30% a 40% no mercado mundial, mas estes valores, aliados ao custo Brasil, tem inviabilizado a produção nacional do SiGS, que é um insumo básico para a produção de 90% dos painéis comercializado no mundo.

Outra possibilidade que se abre para o Brasil é a possibilidade de fabricação de Semicondutores Orgânicos. O país conta com 116 mestres e 498 doutores na área de polímeros e materiais orgânicos eletrônicos. Caso ocorra articulação entre a academia e empresas na área de dispositivos de semicondutores orgânicos, haverá oportunidade de o Brasil exportar esta tecnologia de vanguarda para o mundo (CGEE-NOTÍCIAS, 2012).

Duas áreas se destacam para o uso de semicondutores orgânicos, os OLEDS-Led's orgânicos, desenvolvidos a partir de polímeros, e com uso fotovoltaico. Atualmente é possível criar painéis com células fotovoltaicas orgânicas. O físico húngaro Janes Veres, consultor da tecnologia de semicondutores orgânicos, diz que *“todas as outras fontes de energia estão se esgotando, e para um país solar como o Brasil, essa é uma boa oportunidade, e construir células orgânicas será uma das soluções”*.

Estudos promissores sugerem que o fator de eficiência de painéis orgânicos fique próximo a 10% com vantagens, pois geralmente utiliza tecnologia de filmes finos flexíveis, o que abre a possibilidades de instalações mais simples e baratas, além do baixo custo de produção, baseados no uso do óxido de titânio e pigmentos obtidos de plantas, tais como frutas (TERRA NOTÍCIAS, 2009). Outro avanço nesta área são os painéis orgânicos Tandem de baixo custo, estão sendo desenvolvidos na Bélgica e pretendem levar o desenvolvimento de painéis um novo patamar com 12% de eficiência na conversão Solar/Elétrica e diminuir o custo para menos de 0,70 euros/W.

Um tema relevante para considerar é a quantidade de energia necessária no ciclo de produção do painel fotovoltaico e o tempo de retorno da energia equivalente produzida pelo painel (*Energy payback time*), este tempo é de 1,5 anos para os painéis produzidos pela *SolarPlus* (SOLAR PLUS, 2012) na Figura 2.7. E garante a produção de pelo menos 80% da capacidade em 25 anos (ELEKTOR, 2012).



Fonte: SOLAR PLUS. Produção de Painéis Solares SA. **Módulos Solares fotovoltaicos de silício amorfo com tecnologia thin film**, 2012. Disponível em: <<http://www.solarplus.pt/>>. Acesso em: 14 mar. 2012.

Figura 2.7 - *Expectativa de vida útil do painel fotovoltaico e retorno da energia despendida na fabricação.*

“O IPT submeteu a proposta de projeto de P&D&I, com duração de 3 anos, ao FUNTEC/BNDES (Fundo de Tecnologia do BNDES) tendo como parceira a MINASLIGAS, a qual aportará aproximadamente 10% dos recursos necessários para realização do projeto. A proposta aprovada contará com apoio financeiro do BNDES, no valor de aproximadamente R\$ 11,6 milhões provenientes do FUNTEC”. Há previsão de forte amadurecimento da oferta de SiGS no mercado brasileiro, com novas tecnologias de refino específicas para o nível de pureza 99,9999% grau solar. Há expectativa de queda de preços a patamares muito mais atraentes no cenário internacional (AMBIENTE ENERGIA, 2012)

A corrida pela redução das emissões está apenas no começo, as tecnologias de energia renovável estão sendo incentivadas, pois já se tornaram tendência a ser seguida pelas lideranças mundiais. O projeto da *Green Economy Initiative*, ligado ao Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA⁸ estimula empreendimentos que venha

⁸PNUMA tem entre seus principais objetivos manter o estado do meio ambiente global sob contínuo monitoramento; alertar povos e nações sobre problemas e ameaças ao meio ambiente e recomendar medidas para aumentar a qualidade de vida da população sem comprometer os recursos e serviços ambientais das futuras gerações (PNUMA, 2011).

melhorar o bem estar humano com equidade reduzindo significativamente os riscos ambientais e a escassez ecológica.

2.1.5 - Alternativas ao petróleo no Brasil

Na realidade brasileira, onde nossa matriz elétrica se baseia em hidrelétricas com aproximadamente 75% da energia produzida no país (MME, 2011), e com o uso de fontes renováveis de energia como o Proálcool desde 1975. O etanol, com o timbre de carbono zero e os carros equipados com motores *flex-fuel* já correspondem a 91,5% das vendas de automóveis 0 km em 2007, colocando novamente o Brasil na vanguarda do chamado combustível verde (EPE, 2008).

Entretanto, apesar de estar na frente e poder colher frutos de uma matriz mais limpa em relação a muitos outros países, nossa rede elétrica precisa ser expandida. Exigem-se investimentos crescentes na expansão do sistema elétrico, segundo plano decenal de expansão da energia 2019. Estima-se um crescimento anual de aproximadamente 5% ao ano (MME e EPE, 2011). Para tanto, seria de se esperar, já como tradição do sistema elétrico brasileiro, a construção de novas e grandes usinas hidrelétricas, mas, como os empreendimentos de melhor relação custo benefício já foram construídos no passado, e a construção de hidrelétricas não é simples, pois envolve desapropriações e canteiros de obras que podem levar mais de 10 anos para a sua conclusão, abre-se a oportunidade para as fontes alternativas mais uma vez, como aconteceu no passado com o Pró-álcool⁹ em relação ao petróleo.

Tem-se no Brasil a entrada de fortes investimentos no setor de FV (MPX GRUPO EBX, 2012), que traz consigo a possibilidade de gerar energia das mais variadas fontes e conectá-las, fazendo aproveitamento inteligente de pequenas fontes de energia renovável e cada vez mais próximas do local de utilização. Isto é interessante uma vez que pode apresentar duas grandes vantagens, a utilização em loco, evitando gastos com o transporte da energia, e a conexão de sistemas de geração como solar e eólica ao sistema convencional. Existe a possibilidade da GD instalada na própria unidade de consumo, onde o consumidor participa da geração de parte da energia que utiliza, com o sistema solar

⁹ Pró-Álcool ou Programa Nacional do Álcool foi um programa de substituição em larga escala dos combustíveis veiculares derivados de petróleo por álcool, financiado pelo governo do Brasil a partir de 1975 devido à crise do petróleo em 1973 e mais agravante depois da crise de 1979 (WIKIPÉDIA, 2012).

conectado. Em qualquer ponto do país pode-se incrementar diretamente a quantidade gerada pelos painéis à rede da concessionária, e caso ocorra excedente de geração, com um medidor apropriado, registra-se o que não foi consumido injetando automaticamente na rede elétrica por meio do conversor *GRID TIE*.

Desta forma, não é necessário um banco de baterias como no sistema solar isolado, isto representa maior eficiência devido a melhores taxas de conversão dos conversores *GRID TIE*, atualmente chega a 98% devido à tecnologia de conversão *Sinusoidal Pulse Width Modulation Space Vector Pulse Width-SPWM*¹⁰, reduzindo também o custo de implantação, comparando-se com o sistema de baterias chumbo ácidas (TOLMASQUIM, 2003).

Atualmente, esta tecnologia já está disponível tecnicamente a qualquer consumidor que queira participar com GD, instalando-se os equipamentos necessários.

2.1.6 - Aspectos gerais da conexão fotovoltaica

Geralmente os sistemas geradores derivam de algum tipo de equipamento rotativo, turbinas e estatores, tanto em usinas hidrelétricas quanto de térmicas em geral, possuem geradores que são máquinas rotativas com características bem peculiares e métodos de controle baseados em características físicas destas máquinas que geram energia em Corrente Alternada - CA.

Estas máquinas rotativas do sistema tradicional respondem por quase a totalidade da energia gerada e assim, o sistema de geração, transmissão e distribuição utiliza um tipo de energia alternada em 60Hz, de taxa de oscilação entre suas partes positiva e negativas do sinal senoidal. Como este é o padrão de utilização, todos os eletrodomésticos e equipamentos são projetados para trabalhar com este tipo de energia (FITZGERALD E. A; KINGSLEY JUNIOR C. K.; UMANS S. D., 2006).

¹⁰ Chamado, modulação de largura de pulso senoidal, é usado para controlar a tensão de saída. SPWM mantém o bom desempenho da unidade em toda a faixa de operação entre zero e 78 por cento do valor que seria atingido por onda quadrada (FRANCHI, 2008).

Os painéis solares geram um tipo de energia diferente deste sinal padrão alternado de fases. O painel solar gera energia contínua não oscilante no tempo, com valores de tensão e corrente elétrica para uma mesma quantidade de radiação solar. Assim, pode-se compará-lo com uma fonte de Corrente Contínua (CC) que está presente durante as horas do dia com luz solar, sendo que o nível de tensão e corrente provenientes do painel, variam ao longo do dia e respectivamente com a inclinação dos raios solares e com as nuvens (SHAYANI, 2006).

Para a conversão do tipo de energia de corrente contínua para a de Corrente Alternada-CA, utilizam-se meios eletrônicos para chavear, interromper o fluxo de corrente contínua-CC, criando pulsos elétricos da ordem de 18kHz, que ao passarem por um transformador com núcleo de ferrite, (alta frequência), que tem menor histerese (perdas energéticas), para desenhar a nova forma de onda típica senoidal do sistema elétrico, que pode ser considerada equivalente à CA (FRANCHI, 2007).

2.1.7 - Regulamentação da conexão, incentivos e limitações.

Com o objetivo de regulamentar esta nova possibilidade de conexão de GDFV em grande escala, a Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL, promoveu audiência pública Nº 42/2011, que discutiu a regulamentação de acesso de mini e microgeração distribuída, tarifas diferenciadas para a viabilização da energia fotovoltaica, com a proposta de remuneração diferenciada para produtores de pequeno porte como forma de incentivo ao desenvolvimento destes setores. Com contribuições de algumas empresas em audiências públicas, estabeleceu-se o Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição, do atual PRODIST-Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Resolução Normativa Nº 482/2012 ANEEL, que regulamenta o acesso de micro e minigeração distribuída e estabelecem os contratos, os requisitos técnicos, assim como a distribuição dos encargos entre a distribuidora e o gerador.

Na seção 3.3 – o item, REQUISITOS DE PROJETO, definem os requisitos a serem observados pelos acessantes para elaboração de projeto de instalação de conexão ao Sistema Nacional-SIN. Estabelece que o micro produtor de até 10KW deverá ser conectado no nível de tensão monofásica, esta faixa é a de pequenos produtores

residenciais que podem colocar painéis como forma de reduzir o consumo de energia. De 10KW a 100KW a conexão se dá em rede trifásica (ANEEL, 2012).

No item 5.11 fica definido que: “Os estudos devem prever a possibilidade da central geradora participar do controle automático de geração-CAG e do esquema de corte de geração-ECG, atendendo aos requisitos de proteção e controle estabelecidos nos procedimentos de rede”. Esta exigência levanta a necessidade de se criar um método de conexão completamente novo onde a acessada participa do processo de geração, citado no item 5.12 - “Os estudos devem prever a possibilidade de a central geradora vir a participar de um agrupamento de centrais despachadas por um centro de despacho de geração distribuída” (ANEEL, 2011), O Centro de Despacho de Geração Distribuída-CDGD realiza a gestão técnica e administrativa das centrais do agrupamento.

Conforme o Quadro 2.4, são exigidos os requisitos mínimos e as tecnologias necessárias para correta conexão do sistema de geração aos alimentadores de distribuição. O método de conexão discutido no presente estudo aborda e utiliza esta tecnologia, no tocante a regulação da geração quanto ao limite de penetração de GDFV em Redes Radiais de Distribuição levantada em estudo anterior (SHAYANI, 2010).

Quadro 2.4 - *Requisitos mínimos em função da potência instalada.*

EQUIPAMENTO	Potência Instalada		
	< 100kW	100 kW a 500 kW	500 kW a 1MW
Elemento de desconexão	Sim	Sim	Sim
Elemento de interrupção	Sim	Sim	Sim
Transformador de acoplamento	Não	Sim	Sim
Proteção de sub e sobretensão	Sim	Sim	Sim
Proteção de sub e sobrefrequência	Sim	Sim	Sim
Proteção contra desequilíbrio de corrente	Não	Sim	Sim
Proteção contra desbalanço de tensão	Não	Não	Sim
Sobrecorrente direcional	Não	Não	Sim
Sobrecorrente com restrição de tensão	Não	Não	Sim

EQUIPAMENTO	Potência Instalada		
	< 100kW	100 kW a 500 kW	500 kW a 1MW
Relé de sincronismo	Sim	Sim	Sim
Anti-ilhamento	Sim	Sim	Sim
Estudo de curto-circuito	Não	Sim	Sim
Medição	Medidor 4 quadrantes	Medidor 4 quadrantes	Medidor 4 quadrantes
Ensaio	Sim	Sim	Sim

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Normativa N° 482, DE 17 de abril de 2012. **Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica,** Brasília, p. 4, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2012.

Apesar do item 11.2 que “determina o ACESSANTE como responsável pela instalação de medição adequada em sua unidade produtora para fins de contabilização e faturamento do uso e reserva de capacidade” (ANEEL, 2011), pode-se apontar a utilização do medidor de quatro quadrantes como solução para a medição, mas não atende as exigências de controle e desconexão, no sistema *SMART GRID* torna-se necessária a troca de informações em tempo real entre a acessada e a acessante para permitir o controle da geração e a possível necessidade de desconexão, isto exige um meio de comunicação entre ambas e com a possibilidade de controle à distância da geração, portanto o medidor de 4 quadrantes não atende a todas estas demandas. (Figura 2.8)



Figura 2.8 - Diagrama Básico da GDFV modelo mais simples.

É importante prever o item 5.10 “A acessada deve programar medidas preventivas que impeçam a ocorrência de sobretensões e sobtensões sustentadas em seu sistema de distribuição, decorrentes da inserção e desconexão de centrais geradoras, até a atuação dos reguladores de tensão em operação” (ANEEL, 2011). Portanto verifica-se a necessidade de um controle ativo para o ajuste de tensão, controle de geração e comunicação com o acessante.

Um sistema de comunicação rápido e confiável da operação e o despacho dos equipamentos de regulação de tensão poderão permitir o controle a partir de um centro de despacho de geração distribuída (SHAYANI, 2010).

Seguindo os estudos de impacto de grandes volumes de energia injetados em alimentadores radiais de distribuição tem-se, que o comportamento se dará em diferentes níveis de penetração FV de acordo com o perfil de tensão do alimentador radial (LIU e BEBIC, 2008):

- Aumento de tensão nos circuitos secundários do transformador de distribuição são relevantes devido a um fator de multiplicação de 1:108;
- Necessidade de um sistema de comunicação confiável e versátil de baixo valor de investimento para implantação de garantias para a concessionária quanto à estabilidade do alimentador;
- Os testes realizados afirmam que pequenas penetrações de 5% da carga do alimentador radial, não afetam o perfil de tensão;
- Para um nível de 10% de penetração em relação à carga, o fornecimento de reativos ajustados ao conversor pode reduzir a quantidade de capacitores em 40% em um alimentador radial com características indutivas que necessita de correção de fator de potência;
- Para penetrações da ordem de 30% a 50%, da carga, e energia FV pode substituir completamente os bancos de capacitores fornecendo reativos ao alimentador.

Como a potência produzida pela GDFV é proporcional nível de insolação (energia solar), não é possível controlar o nível de tensão em uma conexão simples, modelado como um sistema que disponibiliza toda a potência ativa produzida pelos painéis (LIU e BEBIC, 2008).

Dados diários de geração, diferenciando feriados de sazonalidades, são relevantes para que os planejadores e gestores do sistema possam simular estudos de hora em hora para um melhor aproveitamento e *performance* dos alimentadores como um todo, inclusive estudos de fluxo de carga negativa para uma modelagem precisa de GD (THOMAS ORTMEYER, 2008).

2.2 – MÉTODOS DE CONTROLE DE ENERGIA

Neste capítulo apresentam-se as tecnologias empregadas para possibilitar o método de controle realizado neste trabalho.

2.2.1 - Modulação por Largura de Pulso PWM

Um método de se fazer a conversão entre CC e CA, é modular a corrente contínua em períodos de tempo e frequência. O método PWM é o mais utilizado nos conversores de energia.

A modulação por largura de pulso (MLP) - conhecida como "PWM" (*Pulse Width Modulation*), é uma forma de variar o valor da transferência de potência entregue a uma carga elétrica (equipamento) com eficiência.

Normalmente, quando tem-se uma fonte de tensão CC e uma carga, e se quer controlar a potência fornecida variando a velocidade de um motor CC, métodos convencionais como o controle pela tensão e pela corrente não são eficientes. Surge então o método para transformar o sinal CC por meio de chaveamento eletrônico de alta velocidade (frequências da ordem de kHz), em pacotes de energia onde a entrega da potência é diretamente proporcional à área de superfície do sinal no quadrante positivo, na Figura 2.9, o efeito obtido com este chaveando permite à fonte CC atender às solicitações da carga com maior estabilidade e possibilidade de ajuste do quanto é fornecido de forma controlada.

Quando se usa o método PWM descrito anteriormente, utiliza-se geralmente uma chave de estado sólido, como o Transistor Bipolar de Porta Isolada-IGBT¹¹, ou o Transistor por Efeito de Campo *Metal Óxido Semicondutor*-MOSFET Figura 2.9, ou até mesmo transistores bipolares, usados para controlar o fluxo da corrente elétrica, ora conduzindo corrente, ora não conduzindo corrente, mas permitindo um controle de tensão muito melhor, o efeito obtido, equivaleria a “ligar a carga numa tensão inferior”, como efeito apenas teórico, pois a curva de resposta de cargas em relação à tensão só é linear em cargas

¹¹Dispositivo de três terminais é semicondutor para o controle de potência, conhecido pela alta eficiência e de comutação rápida (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1999)

puramente resistivas, como a potência instantânea dissipada pela chave é o produto da corrente pela tensão elétrica, num instante que tende a zero, significa que nenhuma potência é dissipada, como se a mesma fosse uma chave "ideal".

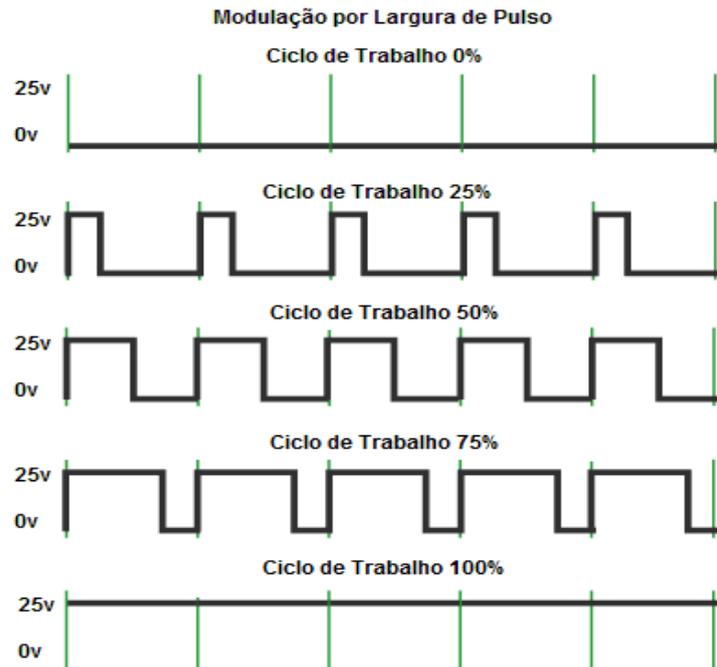


Fonte: FAIRCHILD. Semiconductor MOSFET. **10A, 400V, 0.550 Ohm, N-Channel Power**, 2002. Disponível em: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/IRF740.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2012.

Figura 2.9 - Transistor por Efeito de Campo Metal Oxido Semicondutor - MOSFET.

Com uma taxa de modulação PWM de elevada frequência, na ordem de dez vezes maior que a necessária para a estabilidade na carga, pode-se obter um sinal analógico que produz efeito estável em cargas convencionais, ainda mais se utilizando elementos, como filtros RC onde as mudanças de nível são suavizadas.

Da forma utilizada na modulação PWM, pode-se manipular o tempo e a largura dos pulsos elétricos simulando uma entrega de energia variável de acordo com a razão entre o tempo ligado, e o tempo desligado, como na Figura 2.10. Como a potência entregue, é uma razão entre nível de tensão e de corrente, controla-se o fluxo de potência (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1999).



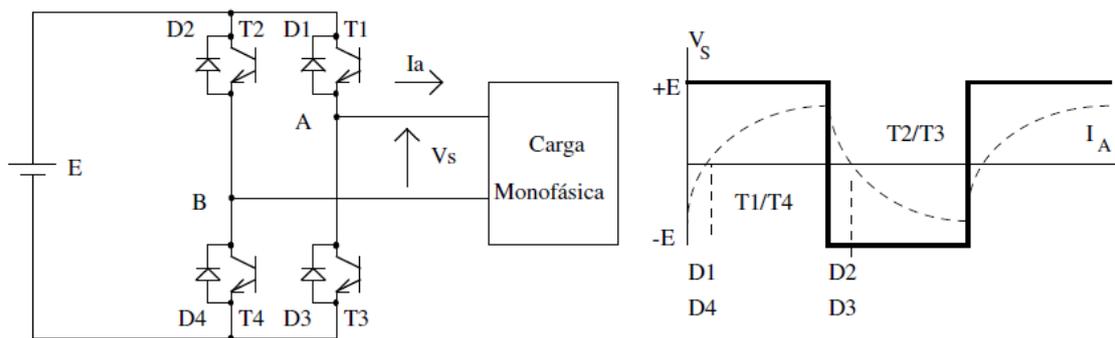
Fonte: ARDUINO. *For information on the development of Arduino. Arduino is an open-source electronics prototyping platform based on flexible arquitetura*, 2012. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 06 Maio 2012.

Figura 2.10 - Entrega de potência do sinal PWM - Ciclos de trabalho.

No gráfico da Figura 2.10, o tempo de acionamento muda, e com isso, muda a entrega de potência na Carga, este artifício é utilizado como exemplo em controle de velocidade de motores com ciclos de trabalho variando de 0% a 100%.

2.2.2 - PWM Aplicado a Conversores de Frequência

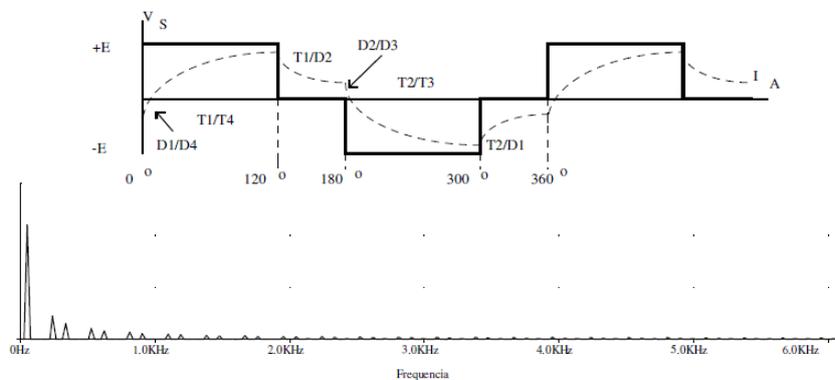
Quando a aplicação é em conversão de energia, são utilizadas algumas técnicas de conversão, como o conversor com saída quadrada, apresentado na Figura 2.11, este método conhecido como Ponte Completa (*fullbridge*) com chaveamento abrupto (*hard*), onde tem-se as chaves T1 e T4 para o primeiro pulso e, conseqüentemente, o acionamento T2 e T3 em um segundo momento. O sistema de controle deste tipo de chaveamento deve ser tal que jamais coincidam os gatilhos de T2/T4 e T1/T3, pois caso isso acontecesse o curto circuito seria franco (Forte), no circuito da fonte. A Figura 2.11 indica o comportamento de corrente no caso de carga indutiva (POMILIO, 2011).



Fonte: POMILIO, J. A. Eletrônica de Potência Módulo 6 FEEC - UNICAMP. **CONVERSORES CC-CA: INVERSORES OPERANDO EM FREQUÊNCIA CONSTANTE**, 2011. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/ee833/Modulo6.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

Figura 2.11 - *Conversor monofásico com forma de onda quadrada.*

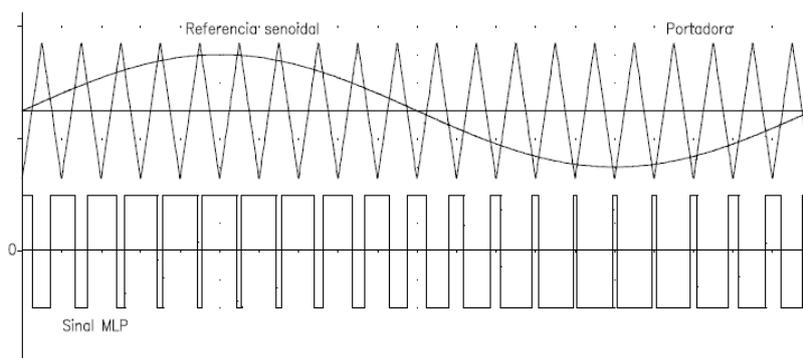
O conversor do tipo onda modificada foi desenvolvido no sentido de melhorar a onda, e diminuir os efeitos harmônicos (geração de ruídos) do sistema elétrico, conforme a Figura 2.12. Neste método, tem-se um intervalo de não acionamento dos MOSFETS (FAIRCHILD, 2002), permitindo um formato mais senoidal à onda de saída.



Fonte: POMILIO, J. A. Eletrônica de Potência Módulo 6 FEEC - UNICAMP. **CONVERSORES CC-CA: INVERSORES OPERANDO EM FREQUÊNCIA CONSTANTE**, 2011. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/ee833/Modulo6.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

Figura 2.12 - *Onda Semi Quadrada.*

Utilizado em aplicações mais sensíveis, como cargas eletrônicas (equipamentos), têm-se o Conversor SPWM¹² – (*Sine Pulse Width Modulation*), como na Figura 2.13. Este método utiliza o chaveamento de alta frequência para obter um sinal alternado de baixa frequência (alta resolução), montando o sinal senoidal de trecho a trecho, a partir de uma portadora, e um sinal de referência a ser copiado, no caso a senoíde da rede. Para que este método seja aceitável, a diferença entre as frequências, da portadora e do chaveamento devem ser no mínimo de 10 vezes. Assim o sinal SPWM é montado a partir das duas informações, a onda triangular, e a onda senoidal de referência.

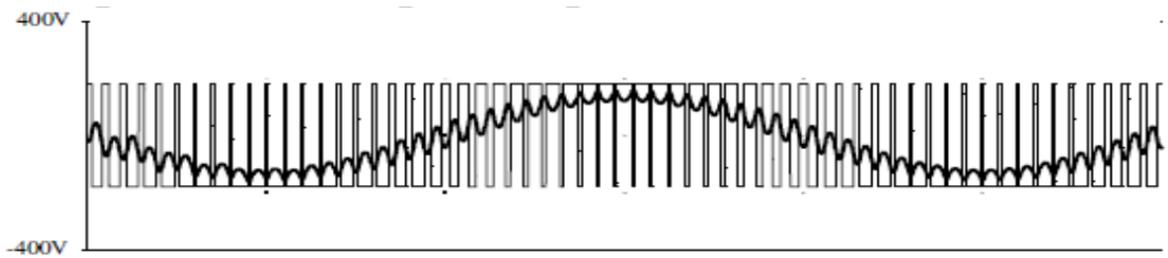


Fonte: POMILIO, J. A. Eletrônica de Potência Módulo 6 FEEC - UNICAMP. **CONVERSORES CC-CA: INVERSORES OPERANDO EM FREQUÊNCIA CONSTANTE**, 2011. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/ee833/Modulo6.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

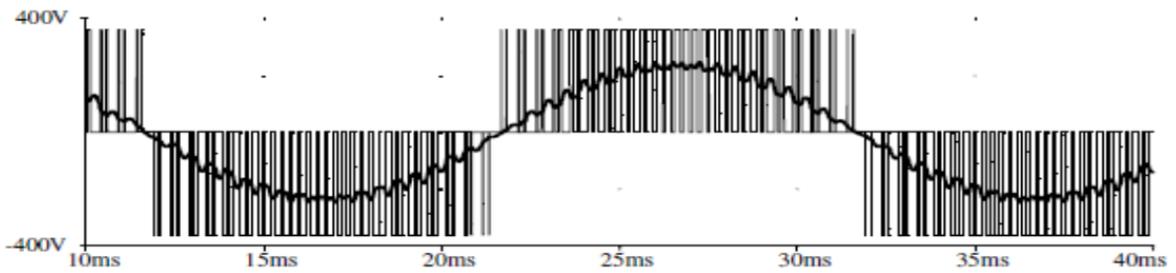
Figura 2.13 - SPWM - Sinal típico de um conversor PWM ideal em dois níveis.

Considerando o nível zero da referência, na Figura 2.14(a), percebe-se que os sinais estão sincronizados no primeiro desenho, visualiza-se o SPWM completo, modulação por largura de pulso em dois níveis. No segundo desenho, Figura 2.14(b), tem-se uma modulação a três níveis (positivo, zero e negativo). O terceiro desenho, Figura 2.14(c), mostra o conteúdo harmônico a dois níveis. O quarto desenho, Figura 2.14(d), mostra o conteúdo harmônico de saída do inversor correspondente à modulação a três níveis.

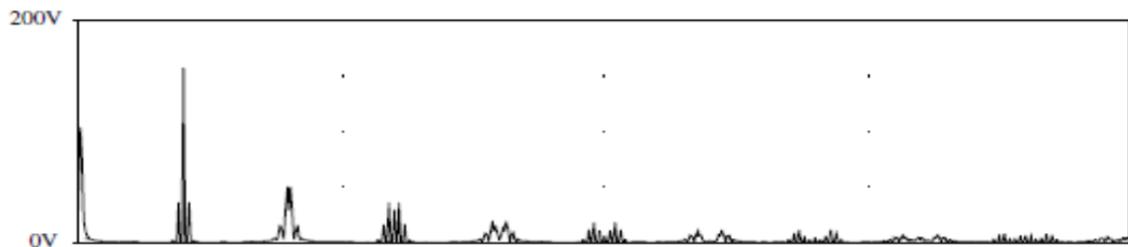
¹²SPWM também chamado modulação de largura de pulso de seno modificado, é usado para controlar a tensão de saída. SPWM mantém o bom desempenho da unidade em toda a faixa de operação entre zero e 78 por cento do valor que seria atingido por onda quadrada (POMILIO, 2011).



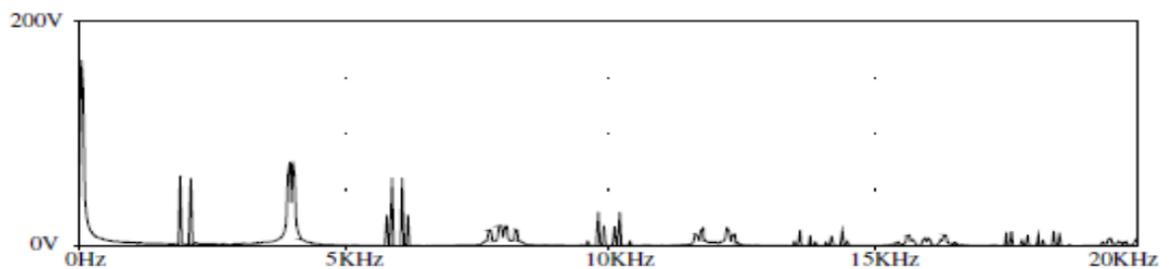
(a)



(b)



(c)



(d)

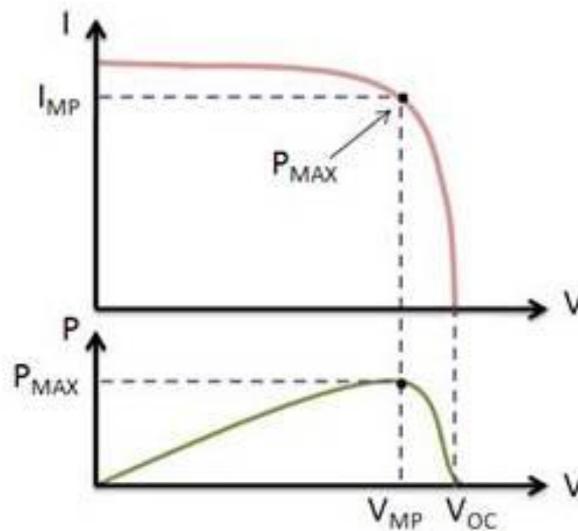
Fonte: POMILIO, J. A. Eletrônica de Potência Módulo 6 FEEC - UNICAMP. **CONVERSORES CC-CA: INVERSORES OPERANDO EM FREQUÊNCIA CONSTANTE**, 2011. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/ee833/Modulo6.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2011(modificado).

Figura 2.14 - SPWM Aplicado em tensão de Fase e Linha; (a) SPWM completo modulação por largura de pulso em dois níveis; (b) modulação a três níveis (positivo, zero e negativo);(c) conteúdo harmônico a dois níveis;(d) conteúdo harmônico de saída do inversor correspondente à modulação a três níveis.

Neste tipo de conversor de energia, caso desapareça o sinal de referência é definido em *hardware* a suspensão da geração dos pulsos de gatilho dos MOSFETS, e com isso eliminada a possibilidade de queima dos mesmos que elimina também a possibilidade de ilhamento da GD em momentos de casos de desligamento (POMILIO, 2011).

2.2.3 - O Algoritmo MPPT

Rastreamento do ponto de máxima potência, *Maximum Power Point Tracking Algorithm*-MPPT¹³ é uma técnica que conversores *GRID TIE* e de carregadores de bateria que a usam para obter a potência máxima possível de um ou mais painéis solares. As células solares têm uma relação complexa entre a irradiação solar, a temperatura e a impedância total que produz uma eficiência de saída não linear baseada na curva de corrente e tensão. O sistema de MPPT amostra a saída das células para aplicar a impedância adequada (carga) para obter uma potência máxima à todas as condições ambientais. Essencialmente, isto define a relação entre corrente e tensão ideal para que o conversor CC possa ajustar os parâmetros elétricos do painel FV a fim de obter o máximo de energia possível, (NI, 2009) Figura 2.15.

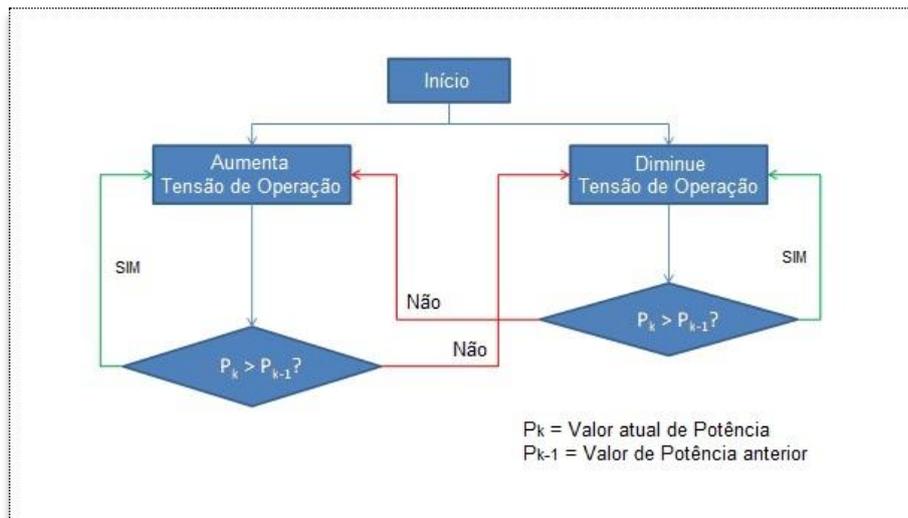


Fonte: NI. *National Instruments. Maximum Power Point Tracking, Theory Behind a Few Algorithms*, 2009. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/8106/en>>. Acesso em: 01 abr. 2012.

Figura 2.15 - Exemplo de curva de corrente x tensão de um painel fotovoltaico, aplicando rastreamento MPPT.

¹³MPPT é o ajuste automático no conversor de energia para alcançar o aproveitamento máximo de potência do painel fotovoltaico (NI, 2009).

Nos conversores microcontrolados o algoritmo de controle deve assegurar o ponto de potência máxima de geração do painel fotovoltaico. Este algoritmo é implementado dentro do microcontrolador, e percebe por meio de sensores os sinais de tensão e corrente provenientes do painel. Com base nestas informações determina-se o ponto de potência máxima (eficiência) de operação. Como esboça a Figura 2.16 na linha ascendente do lado direito do desenho.



Fonte: NI. *National Instruments. Maximum Power Point Tracking, Theory Behind a Few Algorithms*, 2009. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/8106/en>>. Acesso em: 01 abr. 2012 (modificado).

Figura 2.16 - Exemplo de algoritmo de controle conhecido “Perturb and Observe”, monitora a curva de corrente x voltagem MPPT.

No algoritmo é provocado um pequeno incremento de tensão, e verifica-se, caso haja aumento da potência gerada, caso positivo, o algoritmo aumenta mais um pouco até que a potência não aumente mais, quando este ponto é alcançado, ocorre a inversão e diminui-se a tensão, o que pelas características do circuito aumenta a corrente. Verifica-se o aumento de potência. Estes testes e ajustes são processados muito rapidamente em ciclos indefinidos o que acaba definindo um ponto de operação para a condição climática do momento, pois este ponto ótimo muda ao longo do dia descrevendo uma curva de eficiência.

Com todos estes importantes fatores levantados na revisão bibliográfica, o capítulo de materiais e métodos apresenta o estudo dos artifícios utilizados para solucionar todos problemas e permitir a conexão à distância dos módulos fotovoltaicos assim como interagir

e monitorar os níveis de tensão em um centro de despacho à distância de maneira simplificada e segura.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é introduzido o método de controle de injeção de potência de painel fotovoltaico conectado a alimentadores de distribuição radial. Nos tópicos deste capítulo apresenta-se o esquema de conexão, o algoritmo de controle, os métodos de controle de energia e os materiais utilizados. A discussão dos resultados é apresentada no capítulo posterior.

3.1 – DEFINIÇÕES PARA O MÉTODO PROPOSTO

Conforme Shayani, “a quantidade de GDFV que pode ser instalada em uma rede radial de distribuição depende de diversos aspectos, não podendo ser um valor absoluto válido para qualquer configuração de rede” (SHAYANI, 2010)

Para a solução do método de controle GDFV, propõe-se um sistema em sequência, uma vez que o painel fotovoltaico pode ser conectado e desconectado por chaves comandadas eletronicamente.

Um método para o controle de potência e de tensão é descrito, e a solicitação de geração a partir do centro de controle de despacho de geração distribuída tem os seguintes requisitos:

- O controle proposto não se caracteriza nos métodos convencionais de geração;
- Um sistema de comunicação que se comporta controlando o número de painéis conectados à barra CC do conversor de energia-*GRID TIE*, criando a possibilidade de regular a tensão no ponto de conexão de forma ativa e remota;
- Permitir a desconexão de painéis de baixo rendimento dentro de uma geração FV para manutenção sem a parada da planta de geração como um todo;
- Atende à necessidade da telemetria (monitoramento), exigido como elementos de interrupção e desconexão, monitorados à distância pelo controle de despacho de GD (ANEEL, 2011).
- Para efetuar tal controle é necessário um microcontrolador que monitore o nível de tensão no ponto de conexão e, de acordo com o comportamento do sistema elétrico e da GDFV, toma a providência de reduzir a geração FV por meio de sensores

ativos, quando o limite de penetração é atingido ou alguma anormalidade do sistema é percebida;

- Deve ter a capacidade, ainda, de programar o tempo exato de atuação para atender a demanda da concessionária quanto à sensibilidade de distúrbios, ajudando a estabilizar o sistema quando o máximo valor de tensão é atingido;
- Quando a tensão estabilizar pode retomar a geração do valor contratado para o período em total sintonia com o centro de despacho de geração distribuída;
- A concessionária de energia tem o direito de controle da geração, portanto não é permitido ao proprietário acionar a conexão dos painéis fotovoltaicos, pois a conexão só é possível com o sinal de Rádio Frequência-RF criptografado;
- Prevê o superpovoamento de módulos em uma mesma região de forma que o sinal não pode ser copiado, pois existe uma ENCRIPTAÇÃO¹⁴ no canal de 128bits além de número de série exclusivo, tornando assim praticamente impossível burlar este mecanismo.

No presente estudo, conecta-se a geração fotovoltaica no secundário do transformador abaixador, em tensão monofásica de 127VAC.

O método de comunicação aqui proposto é mero acessório acoplado ao processador para realizar a troca de dados, podendo ser substituído por outro método caso haja necessidade.

Os protocolos utilizados podem ser adaptados para outro meio ou modelo de comunicação remota, como protocolos RS-485, MODBUS®, ou ITU-T G.9955/56.

3.2 – MÉTODO DE CONTROLE

Considerando-se que a geração fotovoltaica utiliza painéis de potência de 50W até 200W e que são associados em paralelo para o incremento de corrente, e conseqüente incremento de potência, pode-se dividir uma geração de maior penetração, como no caso de aproveitamentos de 1kW a 100kW.

¹⁴É o processo de transformar informação referida como texto original usando um algoritmo (chamado cifra) de modo a misturar os dados, tornando necessária uma chave para reaver os dados originais (MESSIAS, 2011).

Como o painel fotovoltaico pode ficar com o circuito aberto (desconectado), sem prejuízo para sua integridade, promove-se uma interface antes do Conversor CC/CA *GRID TIE*, com a automação necessária para a conexão dos diversos tipos de painéis, em sintonia com o centro de despacho de geração distribuída via comunicação remota criptografada (segurança), sem o qual a ativação da geração não se processa, passando o controle da geração integralmente ao centro de despacho descrito na Figura 3.1.

O esquema de conexão FV se dá conforme o diagrama que se segue:



Figura 3.1 - Método de conexão que atende as demandas do PRODIST 2012.

Este método resolve o que é proposto e exigido pela Resolução Normativa Nº 482, DE 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012), e ainda traz vantagens para o acessante, o mesmo pode além de cumprir todas as solicitações e exigências, monitorar o próprio sistema por telemetria em qualquer ponto de internet. Na Figura 3.2 vemos os equipamentos para a conexão.

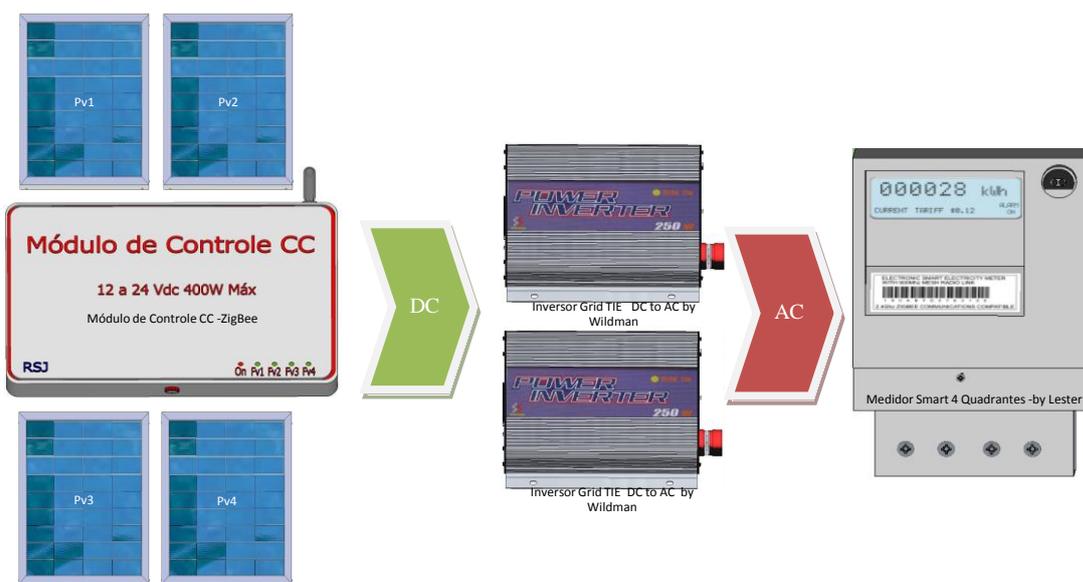


Figura 3.2 - Esquema de conexão do módulo de controle CC.

Como os painéis fotovoltaicos são conectados em paralelo, e promovem um incremento de potência conforme o microcontrolador os acione, permitindo o sensoriamento em tempo real e remoto do nível de tensão no ponto de conexão e informando a quantidade de energia que está sendo efetivamente injetada.

Por meio do módulo de comunicação são enviados os níveis de tensão do ponto de conexão, a corrente injetada pelos painéis em CC, e o comando de conexão ou desconexão dos painéis fotovoltaicos.

3.3 – ALGORITMO DE CONTROLE

A conexão de painéis fotovoltaicos em uma mesma barra CC pode ser feita utilizando-se elementos chaveadores como relés ou chaves eletrônicas, como MOSFETS, bastando, para tal, a utilização de componentes que atendam a demanda de corrente e o limite de tensão de cada painel, por meio de uma entrada para cada painel.

O controle é possível com o chaveamento individual de cada painel, onde se definem as seguintes regras:

- A conexão dos painéis fotovoltaicos deve acontecer em sequência de forma temporizada, começando pelo primeiro painel até o último;
- Durante os intervalos de cada conexão os sinais dos sensores de tensão e corrente são analisados pelo microcontrolador;
- Caso o nível de tensão atinja os valores limítrofes superiores, a conexão é interrompida;
- Caso não atinja os valores limítrofes de tensão e corrente a potência máxima programada pode ser atingida;
- A programação da potência máxima por carga horária é definida pelo controle de despacho de geração distribuída;
- A comunicação entre o módulo de controle e CDGD ocorre de forma *online*;
- A prioridade é a segurança do sistema, mesmo que seja solicitada potência máxima, o algoritmo bloqueia até que os valores de corrente e tensão deixem de ser limítrofes (SHAYANI, 2006);

- O módulo de controle CC recebe e se comunica utilizando Rádio Frequência-RF criptografada e com número de série, evitando interferências e garantindo segurança;
- Um módulo coordenador recebe as informações de diversos módulos de controle e hospeda uma página HTML que disponibiliza acesso via internet para o acompanhamento dos valores de tensão e corrente e também atualização da potência máxima por carga horária.

O Algoritmo que expressa todas as necessidades de controle do módulo de controle pode ser observado na Figura 3.3.

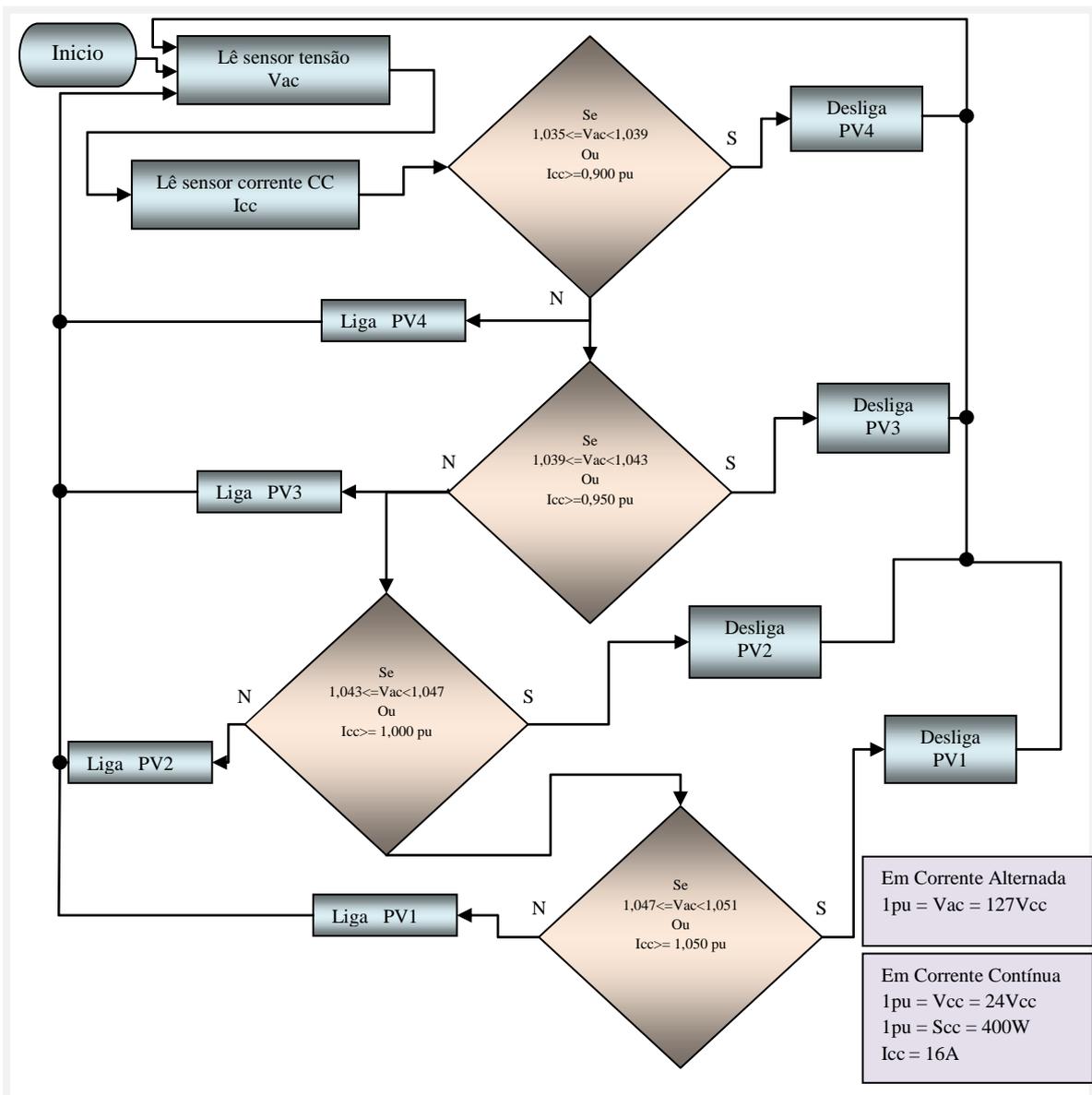


Figura 3.3 - Fluxograma do método de controle utilizado, valores em PU - Algoritmo.

O algoritmo é gravado em um microcontrolador ATMEGA328, que gerencia remotamente o módulo de controle dos painéis chamado de módulo controlador CC. Este microcontrolador fica no módulo de controle remoto, chamado de módulo coordenador.

Um módulo de controle CC suporta quatro painéis fotovoltaicos, o módulo coordenador se comunica localmente via RF com o módulo de controle CC.

O módulo coordenador pode ser conectado a um servidor de internet, e fornecer as informações dos estados de tensão e corrente em tempo real via protocolo RS-232. No servidor de internet pode ser hospedada uma página HTML para dar acesso à informação *online*.

O algoritmo gravado no microcontrolador baseia-se no sensor de corrente colocado na saída do barramento de corrente contínua do mesmo dispositivo e o sensor de tensão colocado no circuito de corrente alternada do ramal conectado ao conversor *GRID TIE*, Figura 3.4.

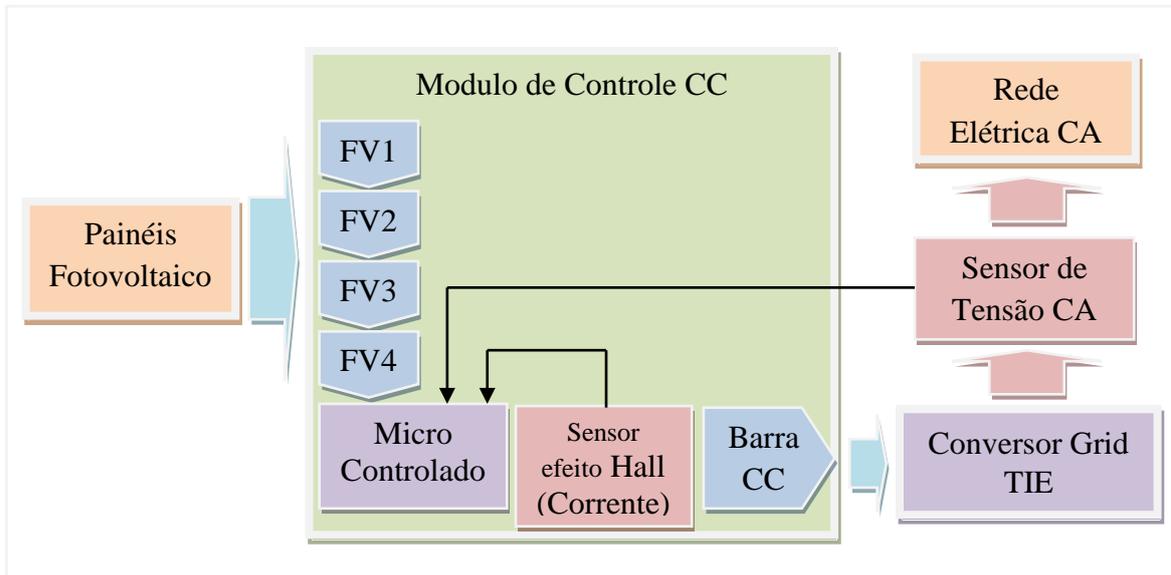


Figura 3.4 - Localização dos sensores de corrente e tensão.

Atuando desta forma, o dispositivo terá condições de “decidir” suas ações de controle de conexão em relação aos painéis, respeitando prioritariamente os níveis limítrofes estabelecidos pela agência nacional de energia elétrica (ANEEL, 2011).

O conversor *GRID TIE*¹⁵ converte a energia de CC para CA de forma automática, pois estes conversores são microcontrolados e podem perceber via sensores, a disponibilidade de energia na barra dos painéis após os módulos de controle, e ajustar os parâmetros da conversão automaticamente para o melhor desempenho a cada instante de tempo.

Uma importante característica do conversor *GRID TIE*, é a detecção de falta de fase e também a abertura do circuito CC, o que interrompe automaticamente a injeção de potência, pois utiliza chaveamento de MOSFETS (chaves eletrônicas), e com isso garante a proteção contra ilhamento da rede, entre outros surtos da rede (FAIRCHILD, 2002).

O controle de *Maximum Power Point Tracking*-MPPT, também ocorre no conversor *GRID TIE*, uma vez que o mesmo é projetado para o uso em painéis fotovoltaicos.

Com a utilização em série dos dois equipamentos, tem-se o módulo de controle que resolve os problemas da geração com grande penetração em alimentadores radiais de distribuição e controle de despacho, e o conversor de energia que resolve os problemas de conexão, além destes ainda é necessário o medidor de 4 quadrantes para validar o consumo e a geração para a comercialização da energia. O algoritmo detalhado pode ser encontrado no apêndice A.

O sistema de controle prevê a comunicação com o Centro de Despacho de Geração Distribuída-CDGD criado pela ANEEL, ligado ao Operador Nacional do Sistema Elétrico-ONS, para monitorar o sistema de geração distribuída, e assim promover o despacho de geração, informando a quantidade de energia permitida a ser injetada em um determinado ponto de conexão. Portanto, o sistema de comunicação deve ser capaz de atuar remotamente, interagindo com o algoritmo de controle local, limitando a injeção de potência em certo valor permitido. Além disso, este sistema deve informar remotamente o nível de tensão no ponto de conexão e a potência entregue à concessionária de energia conforme as solicitações da ANEEL.

¹⁵Tipo especial de conversor de energia que permite a conexão de energia fotovoltaica aos alimentadores radiais de distribuição (SHENZHEN TECHNOLOGY, 2012).

3.4 – CONCEITOS PARA O DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS

Para a aplicação do método de controle de injeção de potência de painéis fotovoltaicos conectados aos alimentadores de distribuição radial, foi necessário desenvolver um módulo de controle CC e um módulo coordenador que atendem aos requisitos elencados nos capítulos anteriores, demonstrados na Figura 3.5.

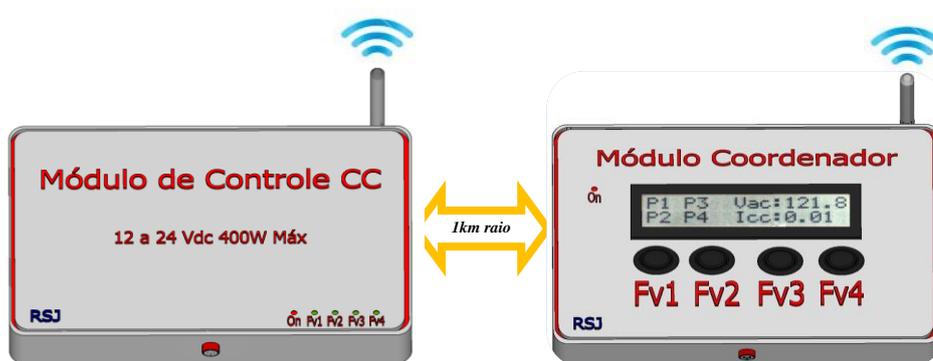


Figura 3.5 - Módulos de controle CC e módulo coordenador.

Para o controle de penetração da GDFV, utiliza-se módulo de controle CC, conectado aos painéis fotovoltaicos, que por sua vez se comunicam com o módulo coordenador via RF (*ZigBee*). No módulo coordenador as informações são apresentadas num *display* de LCD que informa os painéis que estão ligados em tempo real e os níveis de corrente e tensão no ponto de conexão.

Este protótipo do método de controle CC, pode controlar 4 painéis fotovoltaicos em passos de 25%, conforme a lógica de controle. Uma melhor resolução em degraus de controle de geração pode ser obtida colocando mais módulos de controle CC em paralelo. A Figura 3.6 demonstra este modelo.

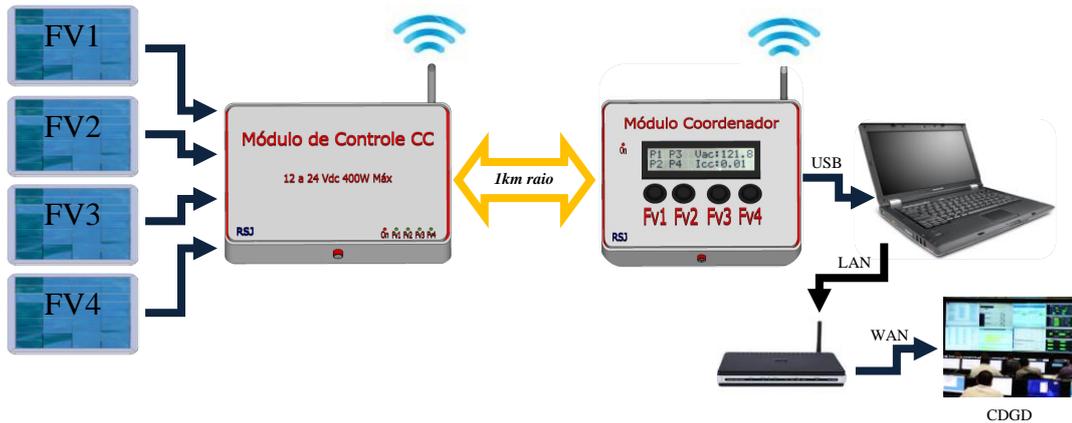


Figura 3.6 - Método de controle aplicado à planta FV comunicação ZigBee.

O módulo de controle CC é microcontrolado, e tem as funções e vantagens:

- Controle ativo da geração por limite de penetração;
- Permite gerenciamento e monitoramento *ZigBee* da produção pelo centro de despacho GD;
- Isolamento de setores defeituosos para manutenção sem desligar toda a planta;
- Elemento de desconexão ativo, por telecomando criptografado;
- Desconexão da geração FV, sem a desconexão do consumidor em AC;
- Permite controle automático de geração-CAG;
- Permite esquema de corte de geração-ECG;
- Apresenta segurança, criptografia;
- Sistema de comunicação convencional sem a necessidade de novas bandas ou regulamentação por parte da ANATEL;
- Monitora valores de corrente e tensão de barra e envia utilizando HTML;
- Atendendo por número de série do equipamento, responsável pelo setor de painéis FV;
- Baixo custo - R\$ 500,00 por módulo;
- Domínio de tecnologia nacional, necessitando apenas de importação de componentes eletrônicos de baixo custo.

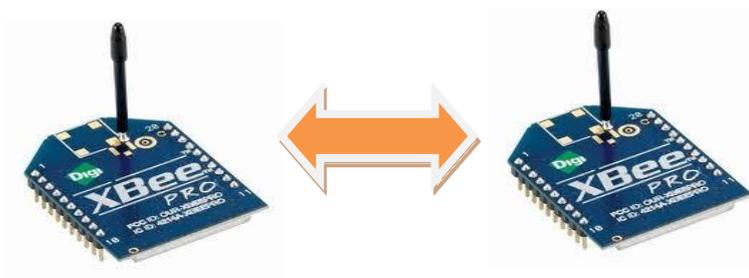
Nos subtópicos a seguir são descritos os detalhes técnicos necessários durante o desenvolvimento dos protótipos assim como a programação necessária e seus pormenores.

3.5 - MATERIAIS UTILIZADOS

Para a aplicação real do método de controle em alimentador radial de distribuição, torna-se necessário a aplicação de diversas tecnologias, que podem ser encontradas a disposição no mercado de componentes eletrônicos atual. A manipulação e correta aplicação dos componentes pode ser elaborada por meio do desenvolvimento de circuitos eletrônicos e *firmwares* construídos para o microcontrolador utilizado com o algoritmo de controle deste método, a seguir descreve-se estas tecnologias.

3.5.1 - Sistema de Comunicação - Módulos RF *ZigBee*.

A comunicação sem fio *wireless* é conhecida há alguns anos em redes WLANS, WMANs, etc., com o objetivo de transmissão de dados e voz de usuários finais a altas velocidades, seja em notebooks, palmtops e celulares. Muitas são as aplicações de redes *wireless* destinadas ao controle de dispositivos como relés, trancas eletromagnéticas, aquisição de dados por sensores, controle de luminosidade etc... Dentre as WPAN (*Wireless Personal Area Network*), um dos padrões utilizados é o padrão RF¹⁶ *ZigBee*¹⁷ IEEE 802.15.4, Figura 3.7. (DIGI, 2011).



Fonte: ALBACORE. Tecnologias de comunicação ZigBee. **Suprimentos Xbee**, 2012. Disponível em: <<http://www.albacore.com.br>>. Acesso em: 02 fev. 2012.

Figura 3.7 - Módulo *ZigBee* comunicação bilateral Full Bridge

¹⁶Taxa de oscilação de 3 kHz a 300GHz, correspondente à frequência de ondas oscilantes que carregam sinais de rádio (WIKIPÉDIA, 2012).

¹⁷Módulo de comunicação com um conjunto de protocolos de alto nível de eficiência e segurança, de baixa potência e significativo alcance podendo chegar a 1,5Km, são rádios digitais com ZigBee no padrão IEEE 802 (DIGI, 2011).

A *ZigBee Alliance* é quem desenvolve o padrão *ZigBee* junto com o IEEE, ocorre associação de várias empresas, que juntas, trabalham em conjunto para proporcionar e desenvolver tecnologias para criar um padrão de baixo consumo de energia com baixo custo, confiabilidade, baseado em uma norma aberta global. Inclui recursos, onde possibilita o aumento da capacidade e abrangência de sua atuação por meio de fabricantes, firmando posição no mercado (ALBACORE, 2012). A tecnologia *ZigBee* permite comunicações robustas e opera em frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), IEEE 802.15.4, sendo na Europa de 868Mhz, e 915Mhz com até dez canais no Estados Unidos de 2,4 Ghz com até 16 canais (ITU, 2010).

As redes *ZigBee* oferecem imunidade contra interferências e a capacidade de hospedar milhares de dispositivos numa rede, com possibilidade de mais de 65.000 dispositivos com taxas de transferências de dados variando de 20kbps a 250kbps. O Protocolo *ZigBee* é destinado a aplicações industriais. Além disso, os módulos foram criados para economizar energia. Podem-se criar dispositivos com sensores à distância alimentados com pilhas e baterias comuns com durabilidade de meses, pois o módulo tem uma função “*Sleep*”, que é ativada quando a transmissão cessa e assim o consumo de energia pelo módulo é minimizado (EE TIMES, 2006).

3.5.1.1 - Escolha da Tecnologia *ZigBee*.

Analisando-se as tecnologias de Rádio Frequência-RF existentes no mercado, optou-se pelo sistema *ZigBee*, devido à sua popularidade, disponibilidade e confiabilidade. O custo também foi considerado. A comunicação deve ser codificada (segurança), e de plataforma sólida para o grande tráfego de dados com um alcance de até 1,5Km por módulo *ZigBee/PRO*, mas este limite pode ser expandido ao limite com a utilização de módulos roteadores programados para atuar nos três tipos de topologia de rede disponível com estes módulos.

3.5.1.2 - Topologias de Rede *ZigBee*

O nome *ZigBee* é um modelo de comunicação inspirado no *zig-zag* das abelhas (*Bee*), pois as mesmas podem se comunicar por caminhos diferentes e de forma independente, se um

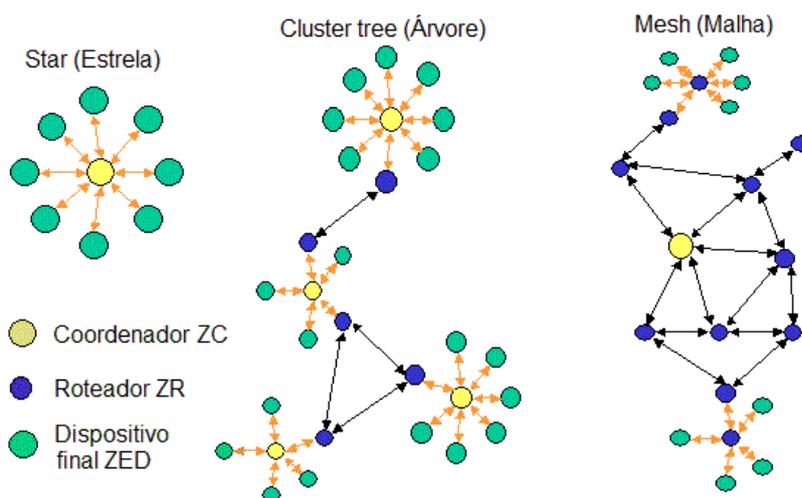
dispositivo está com problemas a informação pode contornar aquele nó defeituoso e chegar ao seu destino. No Padrão *ZigBee* existem três tipos de dispositivos (MESSIAS, 2011):

ZC – (Coordenador *ZigBee*) – Só pode ser implementado através de dispositivo *Full Function Device*-FFD. É responsável pela inicialização, distribuição de endereços, manutenção da rede, reconhecimento de todos os nós da rede, entre outras funções podendo servir de ponte entre redes.

ZR – (Roteador *ZigBee*) – também depende de um dispositivo FFD, tem características de um nó normal de rede, mas com capacidades extras, pode ser roteador intermediário entre nós sem depender do coordenador. Pode ser usado para amplificar o sinal entre andares de um prédio.

ZED – (Dispositivo Final *ZigBee*) – Onde atuadores ou sensores serão instalados fisicamente. Pode ser implementado através de um dos dispositivos FFD ou *Reduced Function Device*-RFD. Assim ele é o nó que consome menos energia, pois na maioria das vezes fica em modo *Sleep*.

As topologias de rede IEEE 802.15.4 (SANTOS, 2007) podem ser classificadas conforme a Figura 3.8:



Fonte: FRIAS, R. N. TELECO Seção: Tutoriais Telefonia Celular. **Tutoriais Telefonia Celular - ZigBee Aplicações**, 2012. Disponível em: http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee/pagina_2.asp>. Acesso em: 24 jun. 2012 (Modificado).

Figura 3.8 - *Módulos ZigBee Diferentes Topologias comunicação bilateral Full Bridge*

- *Star* (estrela) é utilizada localmente, onde existem poucos obstáculos, é muito simples de ser configurada nos módulos uma vez que utiliza apenas um nó coordenador;
- *Cluster tree* (árvore) tem a hierarquia mais sofisticada, com o coordenador assumindo o papel de nó para a troca de informações entre *end devices* e o *router*;
- *Mash* (Malha), a rede se ajusta automaticamente, otimizando o tráfego de dados com vários caminhos possíveis entre os nós é muito utilizada em grandes áreas onde cada componente da rede pode ser utilizado para trafegar a comunicação.

FFD – *Full Function Device* – Dispositivos mais complexos e que precisam de um *hardware* mais potente, pois programam protocolos e consomem mais energia, podem assumir o papel de coordenador roteador ou mesmo dispositivo final (*End Device*). Podem se comunicar com quaisquer membros da rede. São implementados no mínimo com controladores de 32kb de memória de programa, pois podem ser necessárias para implementações mais completas.

RFD – *Reduced Function Device* – São mais simples, onde a pilha de protocolo pode ser implementada utilizando mínimos recursos de *hardware* como Microcontroladores de 8bits com memória de programa próxima a 64Kbytes, mas comunicam-se apenas com dispositivos coordenadores. Na topologia *ZigBee* eles assumem o papel de *End Device* (Dispositivo Final), que na prática podem ser Interruptores de iluminação, *dimmers*, controle de relés, sensores (FRIAS, 2012).

3.5.2 - Conversor GRID TIE

O conversor apresentado neste trecho é um modelo desenvolvido com as tecnologias citadas anteriormente e outras adicionais que serão discutidas ao longo do texto. É um sistema desenvolvido especialmente para a conexão à rede elétrica.

Este equipamento é de fundamental importância devido a seu papel de conversor de energia, a segurança desta operação e todos os fatores correlacionados com o ponto de conexão, com a concessionária de energia e relação custo benefício.

O conversor utilizado no trabalho o *GRID TIE* pode ser encontrado no varejo, uma vez que o método proposto é aplicado em módulo CC – CC que o antecede.

A seguir as características técnicas e de segurança do conversor *GRID TIE* escolhido principalmente em relação ao custo benefício, (YUEQING SANDI ELECTRIC CO LTD., 2011):

- Controle de ausência de sinal de sincronismo 60Hz AC de precisão: a injeção de potência é interrompida imediatamente por meio de chaves MOSFET sem prejuízo para o equipamento;
- Controle de desconexão de barramento CC: quando o barramento de corrente contínua é descontinuado ou interrompido, o circuito interrompe o chaveamento automaticamente sem prejuízo para o equipamento;
- Sistema automático que percebe o nível de luminosidade de acordo com os ângulos de incidência solar em busca da máxima entrega de potência pelo painel (MPPT) *Maximun Power Point Tracking*. É um sistema de controle de alta precisão que imediatamente por meio de algoritmo interno ajusta a saída do painel fotovoltaico por atingir a melhor eficiência e aproveitamento do equipamento;
- Controle gradual do incremento de potência até o limite de potência do equipamento ou a capacidade de fornecimento da fonte, este controle ocorre alterando-se o chaveamento no sentido de mudar a impedância do circuito para testar a capacidade da fonte comparando aos vetores de corrente e tensão e resultante potência instantânea máxima conseguida;
- Sistema de chaveamento configurado para atingir maior fator de potência, próximo à potência máxima de operação do equipamento, chegando a valores aproximados de 0.95;
- Limite de corrente: Limita a corrente máxima na parte CC com um fusível;
- Controle automático de refrigeração interna com ventilador (*cooler*), o controle não só aciona o ventilador quando a temperatura atinge o nível crítico, como modifica a curva de potência para +/- 10% do máximo nominal para aproveitar momentos em que está frio gerando 10% a mais, ou trabalha com 10% menos para esfriar caso supere a capacidade de resfriamento do ventilador;
- Em caso de superaquecimento o conversor desliga automaticamente, e religa quando a temperatura permitir;

- Em caso de sobretensão da parte CC, o mesmo não opera, limitando-se de 10,5Vdc a 28Vdc;
- Travamento ou destravamento automático no ponto ótimo: permite que a saída seja mais estável;
- Pode ser conectado diretamente aos painéis fotovoltaicos, sem a necessidade de conectar um banco de baterias em paralelo;
- Modulação síncrona de alta frequência inicialmente em 120Hz e depois dividida por dois para atingir com mais precisão sinal de 60Hz;
- Onda de Saída Pura utiliza a técnica SPWM;
- Consumo de energia em modo *standby* <1W;
- Permite conexão de vários elementos em paralelo na mesma fase AC, permitindo a expansão gradual da potência instalada como na Figura 3.9.



Fonte: ELEKTROS. Gamyba.it Products Information. **High frequency grid inverter specification, Grid Inverter (High efficiency)**, 2012. Disponível em: <<http://www.elektrosgamyba.lt/en/grid-inverter-high-efficiency1>>. Acesso em: 17 jun. 2012.

Figura 3.9 - Quatro conversores de 250 W, em paralelo

No anexo A, são apresentadas as especificações técnicas do conversor de energia utilizado, observa-se que o método de controle CC pode ser acoplado a qualquer conversor *GRID TIE* disponível no mercado, portanto trata-se de um dispositivo de controle diagnóstico, acesso *ZigBee* e certificação a ser instalado entre os painéis fotovoltaicos e um conversor *GRID TIE*, que por sua vez encontra-se conectado à rede convencional de energia, Figura 3.10, a única observação é de que os níveis de potência entre painéis, módulo de controle e

conversor devem ser compatíveis. Os detalhes construtivos podem ser encontrados no anexo A.

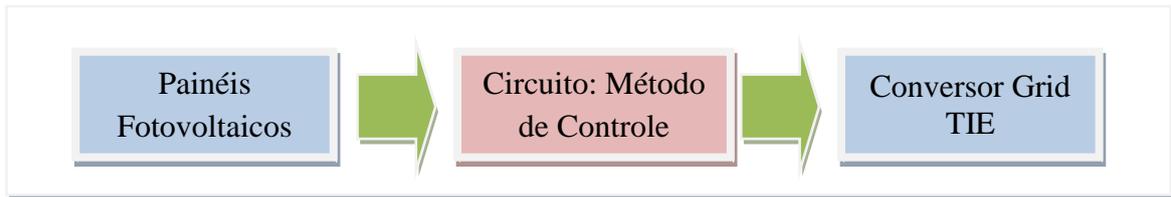


Figura 3.10 - *Localização do método de controle.*

3.5.2.1 - Procedimentos de Operação do Conversor *GRID TIE*

Referências de operação do conversor *GRID TIE* utilizado. As informações do funcionamento são dadas por meio de leds. Indicador de Diodo Emissor de Luz- *LED* Vermelho (ELEKTROS, 2012), Figura 3.11:

1. Proteção de subtensão (atua quando a tensão DC é menor que 10.5VDC);
2. Proteção de sobretensão (atua quando a tensão DC é maior que 28.5VDC);
3. Proteção de sobre temperatura (atua quando a temperatura do chassi supera 75°C, atua por 2-10 minutos e reinicia automaticamente depois de resfriar);
4. Proteção de falta (quando da falta do sinal de 110VAC ou 220VAC ou fora de especificação e desconexão);
5. Proteção contra ilhamento: Quando o sinal elétrico senoidal é interrompido, o conversor automaticamente desliga a saída.

Indicador de *LED* Verde:

1. *LED* Verde Piscando: O conversor está ajustando a potência de saída. MPPT está em condição de ajuste;
2. *LED* Verde Aceso: O conversor está trabalhando em condição de máxima injeção de potência disponível. Ponto definido de geração.

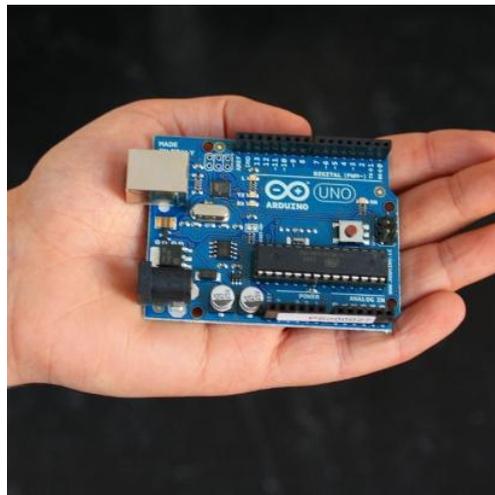


Fonte: SHENZHEN TECHNOLOGY. *Guangdong China (Mainland) global site market. Grid Tie Inverter for solar panel 200W*, 2012. Disponível em: <<http://www.aliexpress.com/product-fm/557675641-200W-Grid-Tie-Inverter-for-solar-panel-wholesalers.html>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

Figura 3.11 - Conversor GRID TIE Painéis de indicação e conexão

3.5.3 – Plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma aberta (*open-source*), de desenvolvimento de protótipos com microcontroladores ATmega328, este sistema baseia-se na flexibilidade, *hardware* e *softwares* interativos com programação em linguagem C++ estruturada (ARDUINO, 2012), Figura 3.12.

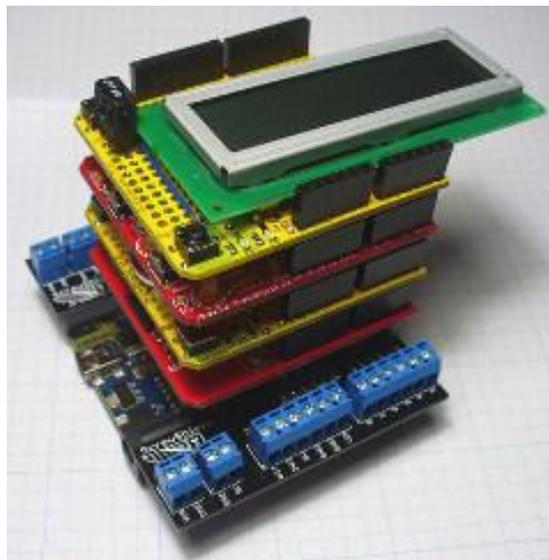


Fonte: ARDUINO. *For information on the development of Arduino. Arduino is an open - source electronics prototyping platform based on flexible arquitetura*, 2012. Disponível em:<<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 06 Maio 2012.

Figura 3.12 - Kit de Desenvolvimento Arduino UNO.

Esta plataforma de desenvolvimento, já possui muitos avanços em bibliotecas e modelos já desenvolvidos para acelerar e tornar didática a programação de sensores e atuadores, permitindo a solução de problemas complexos e demorados em microcontroladores sem suporte, e ou programados de forma menos eficiente como em linguagem de *hardware* (*assembler*) ou utilizando-se aplicativos básicos fornecidos pelos fabricantes de microcontroladores.

Um time de desenvolvedores focados em tornar a programação de dispositivos inteligentes mais acessível, criou uma placa padronizada onde é possível adquirir sensores ou atuadores extras (*Shields*) (SHIELDLIST, 2012), e ampliar as possibilidades de utilização do modelo. Isso garante uma capacidade de programação grande e versatilidade com um custo benefício ao custo de uma dezena de dólares, Figura 3.13.



Fonte: SHIELDLIST. *Shield Arduino List. Pin usage details for 288 shields from 116 makers and counting*, 2012. Disponível em: <<http://shieldlist.org/>>. Acesso em: 03 jul. 2012.

Figura 3.13 - Placas opcionais que podem ser úteis de acordo com o projeto (*shields*).

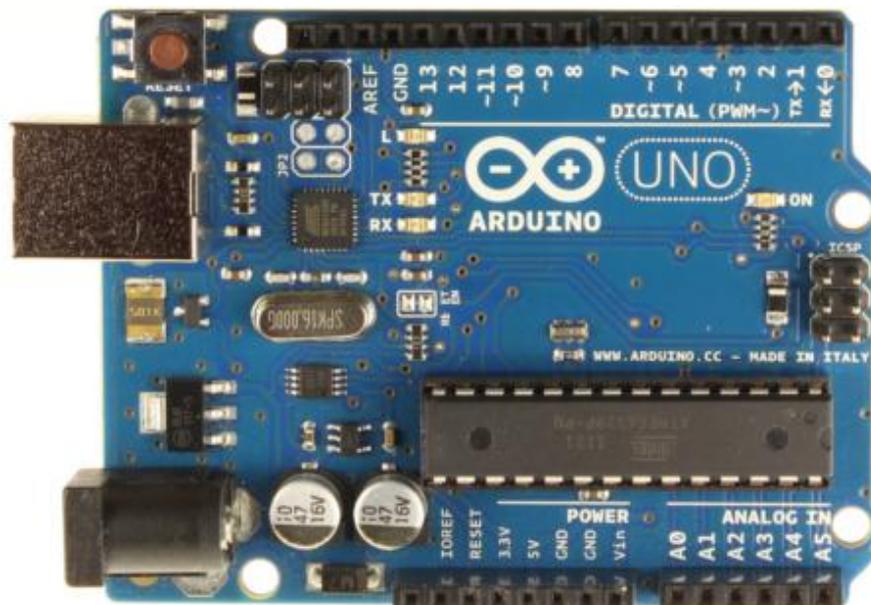
Outra importante característica deste produto é a grande comunidade *online* que o suporta com muitos desenvolvedores e entusiastas que facilitam a aplicação e resolução fácil de problemas complexos quanto à funcionalidade do Arduino e *cases* de utilização abrangentes e maduras quanto a confiabilidade da tecnologia (+ ZERO, 2012).

O kit arduino possui fonte controlada de 3.3V e 5V e outros circuitos que dão suporte para a programação e ensaios em uma mesma placa, num sistema convencional que precisaria

de um gravador para programar o microprocessador e posteriormente de uma placa desenvolvida para ensaiar a programação armazenada (ARDUINO, 2012). As características básicas da plataforma de desenvolvimento são:

- Microcontrolador ATmega328;
- Voltagem de trabalho 5V;
- Tensão de entrada (recomendável) 7-12V;
- Limites de tensão de entrada 6-20V;
- 14 Pinos Digitais de entrada e saída;
- 6 geradores de sinal de controle PWM;
- 6 pinos analógicos;
- Corrente DC máxima de trabalho por pino 40 mA;
- Corrente DC máxima para os pinos em 3.3V 50 mA;
- Memória Flash de 32KB (ATmega328) com 0.5 KB usados pelo gravador (*bootloader*);
- Memória SRAM 2 KB (ATmega328);
- EEPROM 1 KB (ATmega328);
- Velocidade de processamento (*Clock*) 16 MHz;
- Acesso USB para a gravação e monitoramento dos aplicativos.

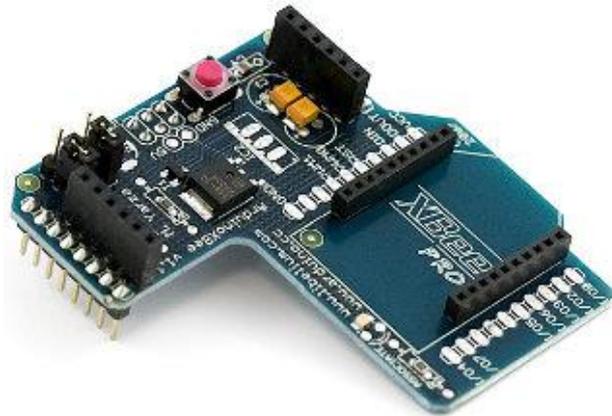
Na Figura 3.14, pode-se verificar os detalhes da pinagem da plataforma Arduino Uno.



Fonte: ARDUINO. *Team Design. Arduino UNO - Overview*, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

Figura 3.14 - Pinagens e detalhes construtivos da plataforma Arduino UNO.

Para a programação dos módulos *ZigBee* utiliza-se um módulo de expansão (*Shield*), da plataforma Arduino (EBAY, 2012), como pode ser visto na Figura 3.15.



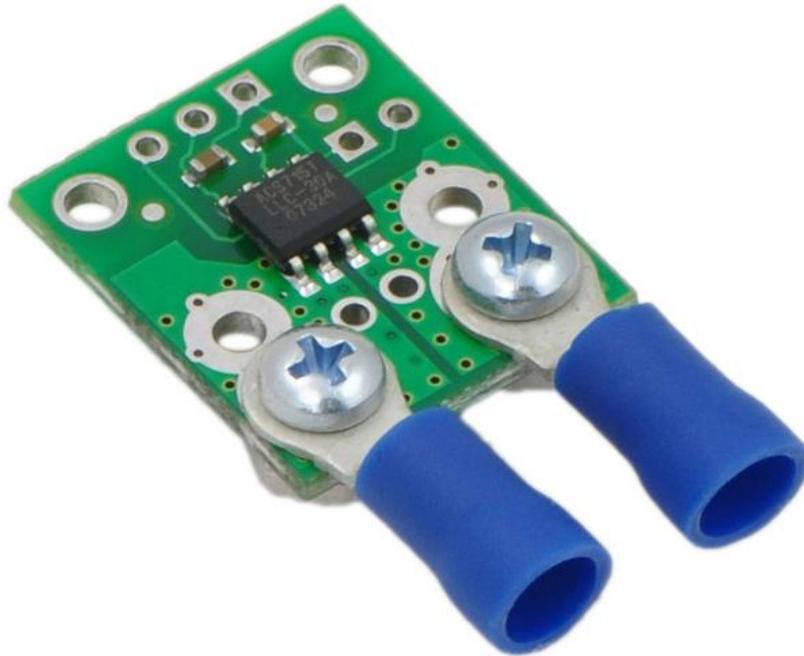
Fonte: ARDUINO. *Team Design. Arduino UNO - Overview*, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

Figura 3.15 - Extensão para a gravação dos módulos *ZigBee* para Arduino.

A plataforma Arduino UNO, permite a retirada do microcontrolador e, portanto pode ser utilizado como gravador, posteriormente com o chip já gravado o mesmo pode ser utilizado em uma placa de circuitos desenvolvida apenas para aplicação e desta forma evolui de protótipo para produto final.

3.5.4 – Sensor de corrente por efeito *Hall*

O sensor de efeito *Hall* que é a produção de uma diferença de voltagem em um condutor elétrico por meio de semicondutor que, de forma transversal com a corrente elétrica no condutor de forma que o campo magnético é perpendicular à corrente, permite saber qual é a carga que trafega pelo fio (corrente elétrica), a saída do sensor é de tempo real como na Figura 3.16 (MULTILÓGICA, 2012).



Fonte: MULTILÓGICA. *Open Source Hardware Store. Sensor de corrente ACS714 -30 a +30A*, 2012. Disponível em: <<http://multilogica-shop.com/sensor-de-corrente-acs714-30-30a>>. Acesso em: 16 jul. 2012.

Figura 3.16 - Placa para Sensor de Corrente o ACS714LLCTR-30A-T.

Este sensor de corrente opera em 5Vdc, e tem a sensibilidade de saída de 66mV/A é desenhado para uma corrente de entrada unidirecional de 30A, mas o circuito pode sobreviver a sobrecorrentes de até 5 vezes este valor. A resistência das trilhas é de 1,2mΩ, e o circuito impresso é feito de cobre de 2-oz de modo a minimizar a quantidade de energia perdida na placa por efeito joule.

A placa de circuito impresso é construída de forma a isolar os circuitos de potência do circuito de eletrônica do sensor em até 2,1kV RMS, o que permite confiabilidade na utilização em circuitos que necessitam de isolamento elétrica.

Características básicas (MULTILÓGICA, 2012):

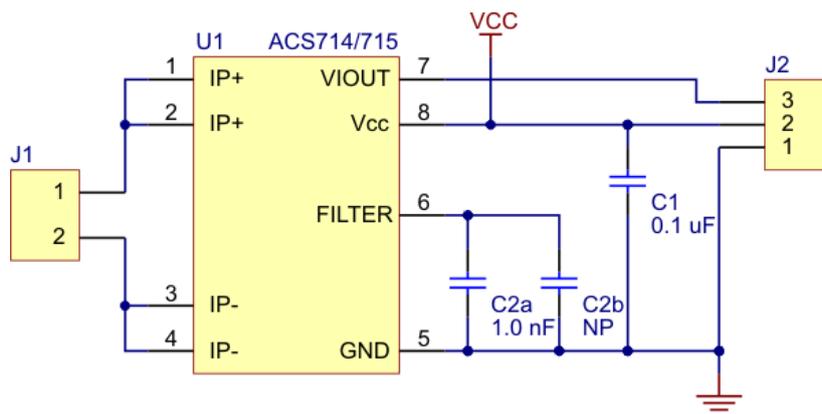
- Frequência de 80kHz de largura de banda que pode opcionalmente ser diminuído usando um capacitor nos pinos marcados como "*filter*";
- Alta acuidade e confiabilidade: erro total típico de saída de 1,5% em temperatura ambiente com calibragem de fábrica, *offset* de voltagem de saída estável, e histerese magnética praticamente desprezível;

- Faixa de temperatura de operação com grau automotivo -40 a 150°C;
- Fluxo de corrente indicado no desenho do circuito (*Silkscreen*);
- Alimentação entre 4,5 e 5,5V conectada em Vdc e GND;
- A voltagem de saída tem um *offset* de 500mV e é incrementada por 185mV ampères da corrente de entrada;
- O circuito integrado tem um filtro de resistência interna de 1,7kΩ e a placa inclui um capacitor de filtragem de 1nF que limita a frequência a 90kHz.

A frequência F que o filtro vai atenuar é dada por:

$$F = 1 / (2\pi RC) = 1 / (11k\Omega * (1 \text{ nF} + C_f)) \quad (1)$$

Onde C_f é o valor do capacitor adicionado o circuito pode ser observado na Figura 3.17.



Fonte: MULTILÓGICA. *Open Source Hardware Store*. **Sensor de corrente ACS714 +30A**, 2012. Disponível em: <<http://multilogica-shop.com/sensor-de-corrente-acs714-30-30a>>. Acesso em: 16 jul. 2012.

Figura 3.17 - Circuito da placa do Sensor de Corrente o ACS714LLCTR-30A-T.

3.5.5 – Placa de Simulação INT700

Desenvolvidas para serem utilizadas com os módulos *ZigBee*, *XBee* e *ZigBee XBee-PRO* (DIGI, 2012). As placas INT700, permitem que os programadores possam explorar, testar, simular e montar protótipos resultando em um aprendizado sobre a tecnologia e também aprimorando o projeto final, Figura 3.18.



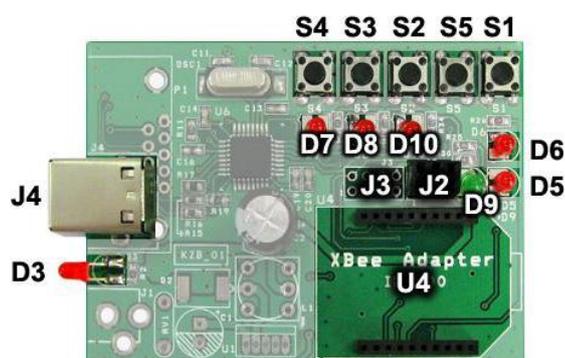
Fonte: ALBACORE. *Connectware technology Store. Manual INT700 Xbee Placa USB e Serial USB*, 2010. Disponível em: <http://www.albacore.com.br/images/albacore/pdf/Manual_INT700_Placa_Serial_USB_v1_04.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2012.

Figura 3.18 - Adaptador USB INT700 para módulos ZigBee - Xbee.

Esta placa permite interagir com os módulos *XBee*, realizando configurações, atualização de *firmware*, comunicação serial, operações com as Entradas/Saídas Digitais e demais recursos do módulo (ALBACORE, 2010).

A placa opera com energia fornecida pela própria entrada USB, permitindo maior facilidade nos testes e configurações.

As características principais da placa INT700 podem ser observadas na Figura 3.19.



Fonte: ALBACORE. *Connectware technology Store. Manual INT700 Xbee Placa USB e Serial USB*, 2010. Disponível em: <http://www.albacore.com.br/images/albacore/pdf/Manual_INT700_Placa_Serial_USB_v1_04.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2012.

Figura 3.19 - Descrição das funcionalidades da Placa.

Os LED's sinalizadores permitem simular as funcionalidades de Saídas Digitais, *status* da comunicação serial e associação dos módulos *XBee*, Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Descrição dos LEDs indicadores.

Led	Cor	Descrição	Pino do Módulo XBee
D3	Vermelho	Ligado / Desligado	-
D5	Vermelho	Comunicação serial	2
D6	Vermelho	Associação	15
D7	Vermelho	Digital I/O 4	11
D8	Vermelho	Digital I/O 11	7
D9	Verde	Comunicação serial	3
D10	Vermelho	Digital I/O 12	4

No Quadro 3.2 encontra-se a pinagem dos módulos *XBee* suportados pela placa no setor U4.

Quadro 3.2 - Pinagem suportada aos módulos *XBee*.

Pinos	Descrição Pino	Observação
01	VDC	
02	DOUT	RX – RS232/USB - Led D5
03	DIN	TX – RS232/USB - Led D9
04	DIO12	Led D10
05	RESET	Botão S5 – Reinicializa o módulo
06	RSSI_PWM / DIO10	
07	DIO11/PWM1(*)	Led D8
08	BKGD	reservado
09	PIN_SLEEP / DIO8	
10	GND	
11	DIO4	Led D7
12	CTS / DIO7	CTS - RS232/USB
13	ON/SLEEP / DIO9	
14	VREF	
15	ASSOC / DIO5	Led D6
16	RTS / DIO6	RTS - RS232/USB
17	ADC3 / DIO3	Botão S4
18	ADC2 / DIO2	Botão S3
19	ADC1 / DIO1	Botão S2
20	ADC0 / DIO0 /	Botão S1

Para maiores detalhes a respeito do funcionamento, consultar referências em (MESSIAS, 2011).

3.5.6 – Medidor de Energia P4400

Para a comprovação e aferição da energia efetivamente injetada na rede escolhe-se o medidor de energia digital de baixo custo, modelo P4400 (KILL A WATT, 2012), Figura 3.20.



Figura 3.20 - Medidor de energia P4400.

O medidor tem as seguintes características:

- Display LCD;
- Monitor acumulativo de Kilowatts-hora;
- Funciona em tempo real;
- Tensão RMS;
- Corrente RMS;
- Frequência Hz;
- Potência Ativa em Watts RMS;
- Potência total em VA RMS;
- Mede o fator de potência total na escala 0.0 a 1.0;
- Precisão em todas as medidas de 0.2%.

Com as especificações de acordo com o Quadro 3.3:

Quadro 3.3 - Especificações técnicas do medidor de energia utilizado.

Modelo	P4400
Voltagem de operação	115 VAC
Voltagem máxima	125 VAC
Corrente máxima	15 A
Peso	5 oz
Dimensões	5 1/8" X 1 5/8" X 2 3/8"

Este medidor permite registrar a energia gerada acumulada no período, assim uma vez acionado o conversor pode-se medir o total injetado já descontado o consumo da placa de controle, seja por mês ou por todo o período que estiver sendo realizada a medição.

Tem-se também um diagnóstico da rede elétrica, onde no ponto de conexão pode-se medir em tempo real todas principais grandezas elétricas (KILL A WATT, 2012). A Figura 3.21 apresenta todas as funções do aparelho. Maiores detalhes sobre o funcionamento do equipamento podem ser encontrados no anexo B.



Figura 3.21 - Detalhamento das funções do medidor de energia P4400.

3.5.7 – Display LCD

Para a verificação em tempo real do nível de corrente e tensão assim como interação com os painéis conectados adiciona-se um *display* de LCD ao Arduino apresentado na Figura 3.22, para compor módulo coordenador.



Fonte: WINDSTAR. Product Details. **Standard LCD module**, 2012. Disponível em: <http://www.winstar.com.tw/products_detail_ov.php?col_lang=en&ProID=24>. Acesso em: 10 jul. 2012.

Figura 3.22 - *Display de LCD 16X2.*

Este *display* possui 16 colunas e 2 linhas, é o modelo padrão, as seguintes características principais (WINDSTAR, 2012):

- Alimentação 5Vdc;
- Ajuste de Contraste;
- Barramento de dados de 8 bits;
- Pino de habilitação;
- Pinos de ativação escrita e leitura.

3.5.8 - Paineis solares

Para ensaios do sistema *SmartGrid* utiliza-se 4 painéis solares de 75W SIEMENS, numa estrutura de suporte apresentada na Figura 3.23.



Figura 3.23 - Suporte com quatro painéis solares Siemens SP-75.

A estrutura de suporte acima foi desenvolvida por trabalho anterior para seguir o Sol com recursos passivos, por meio da expansão de gases diretamente proporcional à concentração térmica em sua câmara de expansão, neste trabalho, é utilizado apenas como suporte para os painéis. O painel utilizado na experiência tem as características descritas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 - *Parâmetros Elétricos de placa do Painel Fotovoltaico SIEMENS.*

Tensão Nominal [V]	12
Potência máxima Pmax [Wp]	75
Corrente máxima IMPP [A]	4.4
Tensão de máxima potência VMPP [V]	17.0
Corrente de curto circuito ISC [A]	4.8
Tensão de circuito aberto VOC [V]	21.7

A potência máxima do Painel fotovoltaico é de 75W com uma corrente máxima de 4,4A, portanto os condutores e componentes de potência do circuito do painel devem ser maiores ou iguais a este valor.

Os equipamentos dos ensaios foram instalados no Laboratório de Fontes Alternativas de Energia do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Mato Grosso-IFMT Campus Cuiabá Departamento de Eletro Eletrônica-DAEE com apoio do programa MINTER UNB/IFMT.

A confecção dos protótipos eletrônicos ocorreram com recursos próprios, e obteve-se apoio do laboratório de Sistemas Microcontrolados do IFMT/DAEE. No capítulo a seguir são apresentados os resultados e análises obtidas com os protótipos.

4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Apresenta-se a seguir protótipos que desenvolvidos ao longo deste trabalho e que servem de ferramenta de aplicação do método proposto, conceitos e lógicas levantadas em materiais e métodos são experimentadas na prática. Após os detalhamentos da confecção dos protótipos, faz-se discussão dos valores medidos e resultados obtidos.

4.1 – DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DO MÉTODO DE CONTROLE COM PROTÓTIPO

4.1.1 – Protótipo do módulo de controle CC

Na Figura 4.1 são apresentadas as entradas, onde os painéis fotovoltaicos são conectados a chaves eletrônicas, de acordo com o comando do microcontrolador que está previamente programado com o algoritmo de controle. Visa-se atender aos requisitos técnicos de gestão da conexão, podendo inclusive ter parâmetros alterados à distância pelo CDGD, por meio de um módulo de comunicação. Este módulo é criptografado para garantir a confiabilidade e permitir a conexão de vários dispositivos num mesmo ambiente sem que um interfira no outro.

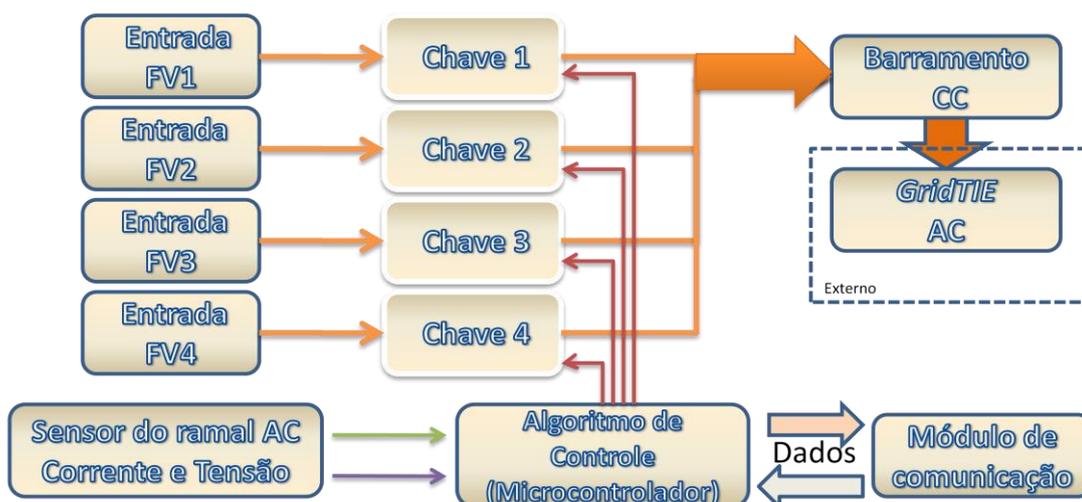


Figura 4.1 - Visão interna do módulo de controle CC.

Cada painel fotovoltaico é conectado a uma entrada no módulo de controle. Têm-se os canais de entrada que são realizados por dispositivo MOSFET de capacidade para 100W por canal, controlados diretamente pelo microcontrolador que automatiza a conexão dos painéis. Tornou-se necessário um sistema de acoplamento óptico para tratamento das interferências do circuito de potência com o circuito do microcontrolador.

No módulo de controle CC tem-se o transmissor *ZigBee*, o sensor de corrente do barramento CC (interna), que permite ter referência da geração em tempo real e o sensor de tensão alternada no ponto de conexão com a rede da concessionária. A parte de potência da placa tem os canais separados por relés, com potência de até 10A por canal, permitindo a conexão de até 400W de potência oriunda de painel fotovoltaico.

4.1.2 – Detalhes construtivos do protótipo do módulo de controle CC

O processo de concepção de um circuito eletrônico parte das idéias funcionais do mecanismo e de quais componentes eletrônicos são capazes de atender às demandas de corrente e tensão exigidas pelas cargas e as diversas possibilidades de controle. A experiência mostra que deve-se utilizar métodos computacionais de simulação dos circuitos antes de montá-los na prática, pois as possibilidades de desperdício de material e danificação de componentes sem uma boa simulação do circuito é muito comum.

Além disso, no simulador utilizado, tem-se uma extensa biblioteca de componentes à disposição, e com a vantagem de que na modelagem não tem surpresas, como mau contato elétrico, eventual choque elétrico do utilizador e componentes queimados.

O simulador tem ferramentas de ensaios elétricos como multímetros, amperímetros, osciloscópio e gerador de sinais, que permitem ensaios sem limitação de quantidade, por exemplo, pode-se colocar um amperímetro em cada parte do circuito, e observar as mudanças que um chaveamento provoca em todas as partes (LABCENTER, 2012).

Com o simulador de circuitos ISIS-PROTEUS faz-se inúmeras interações e desenvolve-se um circuito que atende à proposta do método de controle, cálculos de circuito eletrônico e limitações de corrente são simplificados via *software*. Apresentam-se os resultados no circuito da Figura 4.2.

No método defendido, monitora-se o nível de tensão AC no ponto de conexão antes do medidor de energia de quatro quadrantes, opta-se por alimentar o circuito do módulo de controle CC no mesmo ponto de conexão que o *SmartGrid* está conectado, pois assim monitora-se o sinal de tensão AC, aproveitando o cabo de alimentação do módulo de controle CC como na Figura 4.3. Além disso, caso o sinal senoidal de referência AC 127 Vac falte, o conversor é desligado, bem como o módulo de controle CC, deixando os painéis desconectados com os relés abertos.

Inicialmente concebem-se os circuitos das fontes de tensão necessárias para as diferentes partes do circuito, que são:

- 3,3 Vdc para o funcionamento do módulo *ZigBee*;
- 5 Vdc para o sensores de corrente, tensão;
- 12 Vdc para o circuito de acionamento dos relés.

Após os ensaios de circuito, via simuladores, e dados de dimensionamento da prática, via ensaios no *proto-board*, foram resolvidas as interferências nas fontes reguladas individuais 5Vdc, 12Vdc e 3,3Vdc, esta última por meio de regulador variável LM317. Foram utilizados filtros capacitivos dimensionados nas respectivas saídas reguladas, conforme Figura 4.3, que mostra a visão do circuito montado no *proto-board* para ensaios.

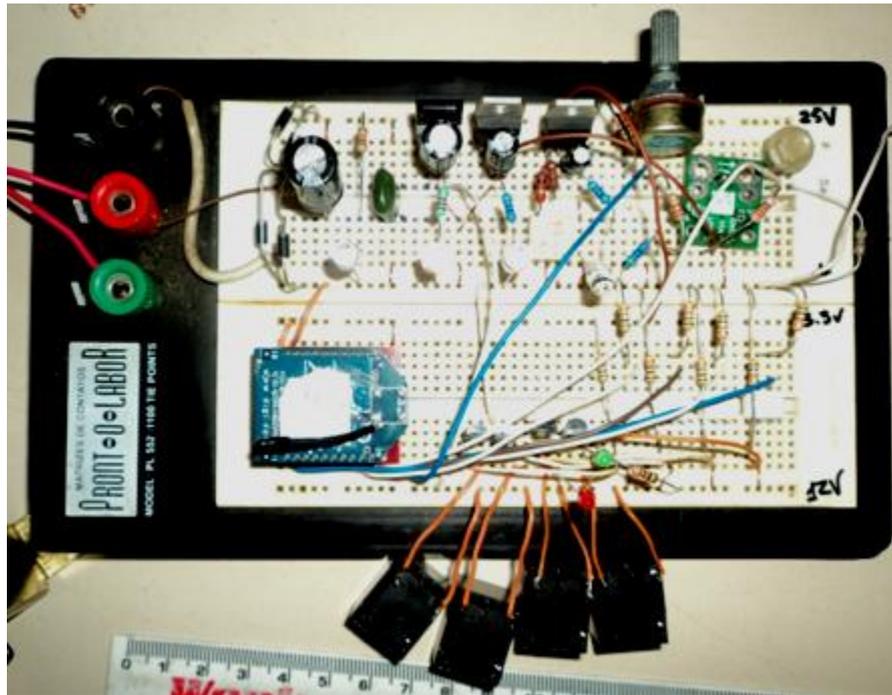


Figura 4.3 - Protoboard utilizado na montagem dos circuitos eletrônicos, ensaios e testes.

Seguindo o circuito apresentado, realizou-se as conexões dos módulos *ZigBee Xbee-PRO* aos optoacopladores. O optoacoplador é conectado aos relés de saída e estes acionam os painéis solares que estão conectados no circuito secundário do relé, promovendo a ligação em paralelo dos painéis, somando as entradas a um único barramento CC.

No barramento CC o sensor de corrente por Efeito *Hall* (*ACS715*), gera o sinal analógico que é conectado ao pino *AD0* do módulo *ZigBee* no módulo de controle CC, este sinal analógico passa por conversor analógico/digital no *ZigBee Xbee-PRO* e é transmitido e criptografado ao outro kit *Xbee-PRO* do módulo coordenador que passa por conversor digital/analógico voltando a ser nível de tensão analógico e entrando no pino analógico *AN0* do *ATmega328* na placa *ARDUINO* onde é convertido novamente para sinal digital. O sinal é interpretado pelo algoritmo e apresentado no *display* de *LDC*. O mesmo procedimento pelo canal *AD1* ocorre com o sinal analógico de tensão proveniente do circuito divisor de tensão secundário do transformador de força do módulo de controle CC, que chega ao pino *AN1*(entrada analógica) do *ATmega328* no coordenador, conforme Figura 4.4.

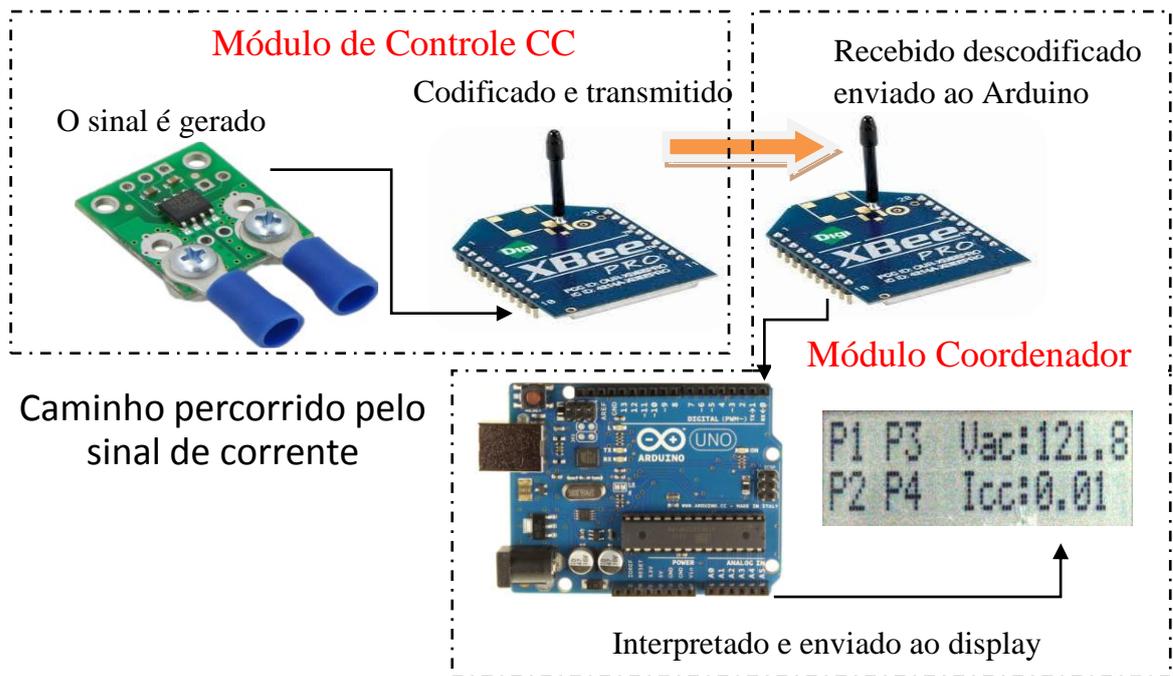


Figura 4.4 - Caminho percorrido pelo sinal de corrente até o display.

No módulo de controle CC não há processamento dos sinais, utiliza-se o modo de comunicação AT onde programa-se o pino para informar em tempo real qualquer alteração dos valores em seus pinos para o coordenador, onde está o microcontrolador ATmega328 com a capacidade de monitorar, controlar e dar resposta às solicitações do centro de despacho CDGD por meio do coordenador.

Na Figura 4.5 tem-se o módulo *ZigBee Xbee-PRO* e a sua respectiva base (soquete), utilizados tanto no módulo de controle CC como no coordenador.

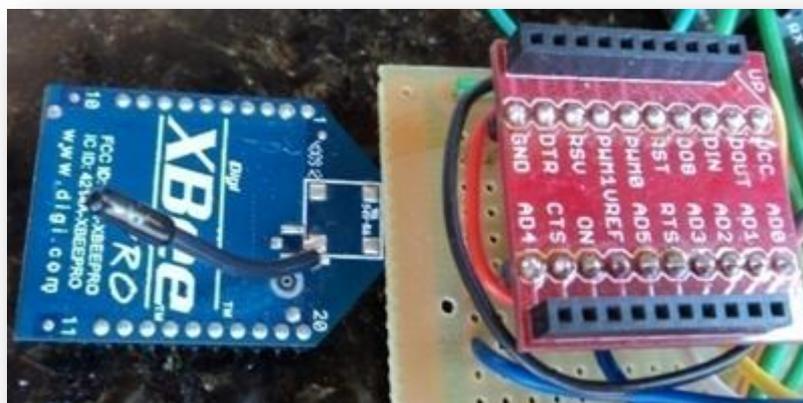


Figura 4.5 - Soquete do módulo *ZigBee* e o módulo *ZB/ROS1* com a sua respectiva pinagem.

O uso de optoacopladores é relevante, pois além da possibilidade de interferência dos chaveamentos no circuito microprocessado, pode-se trabalhar com dois níveis de tensão diferentes de cada lado, de forma direta.

Utilizou-se LEDs para sinalizar o acionamento do canal quando ativo. Os relés utilizados têm a capacidade de conduzir 10 a 28 Vdc. A potência limita-se à 400W por canal de conexão e depende da capacidade de condução do relé. Para tornar simples a conexão dos diferentes circuitos, utilizam-se conectores TBLOCK parafusáveis.

O uso de dissipadores se tornou necessário, principalmente devido ao módulo *ZigBee*, pois consome aproximadamente 215mA na transmissão com o sinal de RF, esta potência é do transmissor que é de longo alcance 1,5Km sem contar com o acionamento dos canais por meio dos optoacopladores (DIGI, 2011)

4.1.2.1 – Design computacional da placa eletrônica do módulo de controle CC

Para o processo de construção da placa do circuito, utiliza-se *softwares* simuladores de circuitos eletrônicos ISIS-PROTEUS da Labcenter (LABCENTER, 2012) e a respectiva suíte de desenvolvimento ARES de *Layout* do protótipo, a importação do circuito do simulador ISIS para o simulador de placas ARES, é feita por NETLIST (relação de componentes e circuitos), permite depois de inúmeros ajustes o resultado final obtido, ilustrado na Figura 4.6.

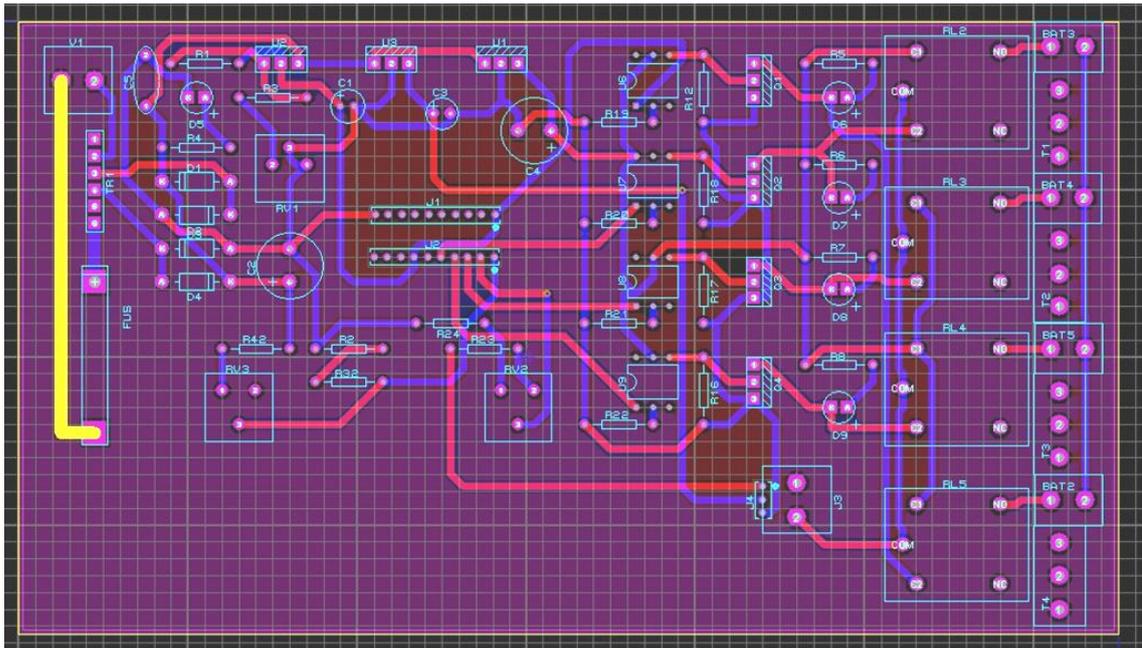


Figura 4.6 - *Layout do circuito da placa, módulo de controle CC.*

As melhores suítes de desenvolvimento de *layout* já possuem a visualização 3D do circuito, o que é de grande utilidade para visualizar de antemão se a disposição física dos componentes está realmente correta e evitar erros de posicionamento provocados por desconhecimento do tamanho que o componente irá ocupar na placa em tamanho físico real, Figura 4.7.

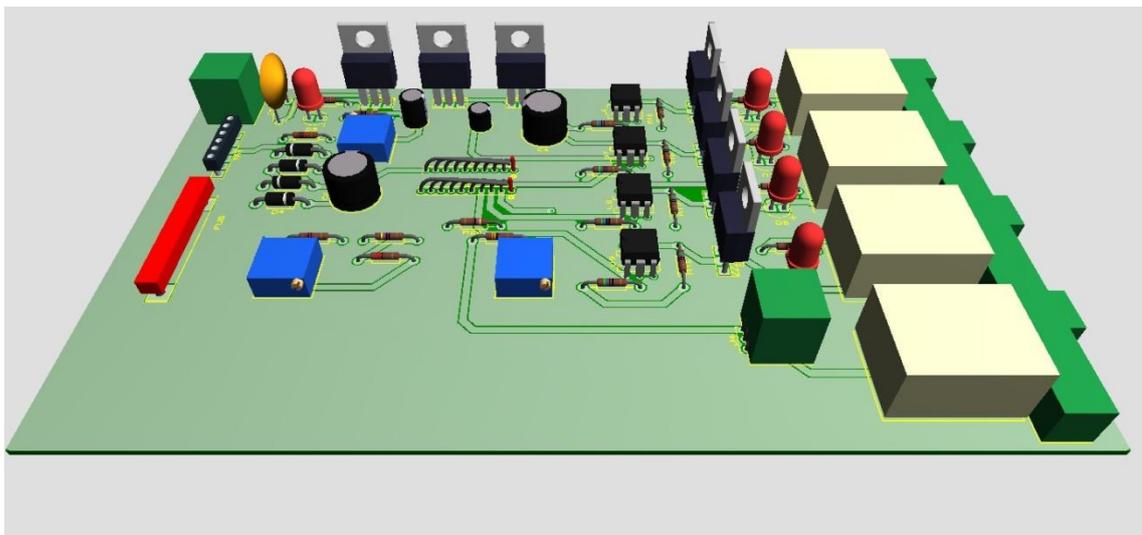


Figura 4.7 - *Disposição dos componentes da placa e do circuito, detalhamento 3D.*

Alinhou-se os reguladores de tensão com a face de dissipação (metálica) voltados para fora no sentido de facilitar o resfriamento por meio da colocação de dissipadores de calor.

Na figura 4.8, verifica-se em detalhes os pinos dos componentes de suas trilhas. Como se trata de uma placa de transmissão de dados em frequência de 2,4 GHz, tem-se o cuidado de deixar ilhas de cobre conectadas à terra do circuito DC, visando evitar interferências, e a remoção demasiada de cobre da superfície da placa que provoca a perda de resistência mecânica. Outra vantagem de se deixar ilhas de cobre é de permitir posteriores ajustes no circuito mesmo após a sua corrosão com a reutilização destas áreas.

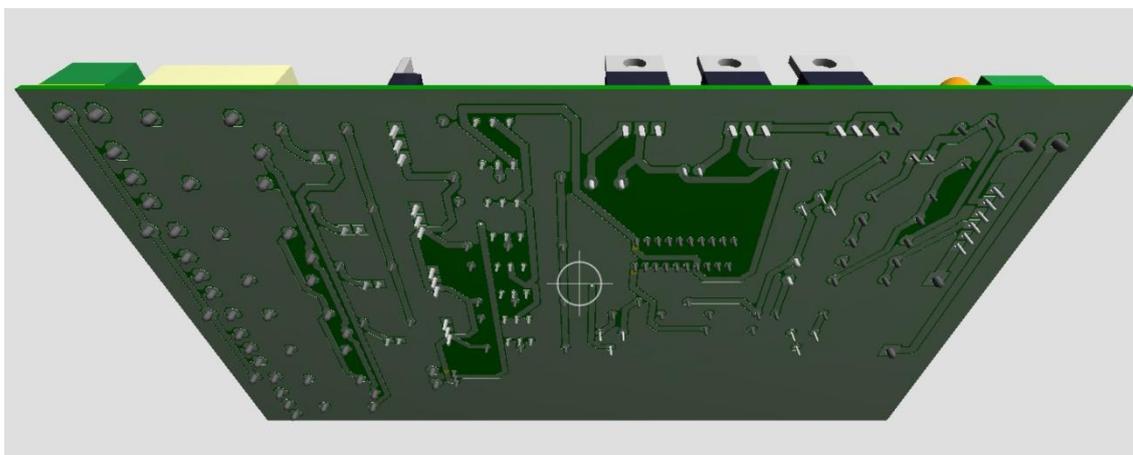


Figura 4.8 - Parte inferior da placa de conexão, estação ZigBee, circuito 3D.

Construiu-se a placa do protótipo artesanalmente, o fato de ter duas faces dificulta a confecção, pois o circuito da parte de cima tem de estar perfeitamente alinhado com os orifícios da parte de baixo da placa.

Utiliza-se a técnica de impressão do circuito eletrônico invertido, do tipo espelho que é então impresso em uma transparência para impressoras laser, já com o circuito na transparência decalca-se o mesmo na placa de fenolite que possui dupla superfície de cobre (em cima e em baixo), faz-se coincidir os dois desenhos verticalmente, a parte de cima e a parte de baixo e adiciona-se calor com um ferro de passar roupas. Com este método, a tinta migra da transparência aquecida para a superfície de cobre, protegendo as trilhas que não devem ser corroídas pelo agente químico Percloroeto de Ferro, que corrói o cobre não protegido pela tinta, descrito na Figura 4.9.



Figura 4.9 - Descrição da confecção artesanal da placa eletrônica do protótipo.

Existem outras técnicas de confecção de placa eletrônica, mas a mais utilizada é o método serigráfico utilizado por empresas especializadas em fabricar placas profissionais para a indústria, estas empresas geralmente recebem encomendas de grande número de placas à semelhança de gráficas, onde se encomenda milhares de cópias. Para que o circuito desenvolvido no ARES seja compatível com o equipamento gráfico é necessário gerar arquivos em formato GERBER¹⁸ onde o circuito eletrônico será dividido em máscaras, por exemplo superfície de cima (*layer top*), de baixo (*layer bottom*), uma estância só com os ofícios (*holes*), e outra com o desenho (*silkscreen*), dos componentes. A lista de componentes é encontrada no apêndice B.

Após a placa eletrônica ser confeccionada, procede-se com a solda dos componentes que compõe o circuito. Após conferência e medição, a conexão dos componentes do circuito passa aos testes e aos ensaios. No apêndice C apresenta-se o desenho da placa do módulo de controle CC.

¹⁸Tipo de arquivo eletrônico, para a impressão realizada por máquinas profissionais de confecção de placa de circuito impresso (eletrônico) (WIKIPÉDIA, 2012).

4.1.2.2 – Módulo de controle CC construído

Apresenta-se a seguir o protótipo construído para testes e ensaios de controle de geração de painéis fotovoltaicos conectados, Figura 4.10.

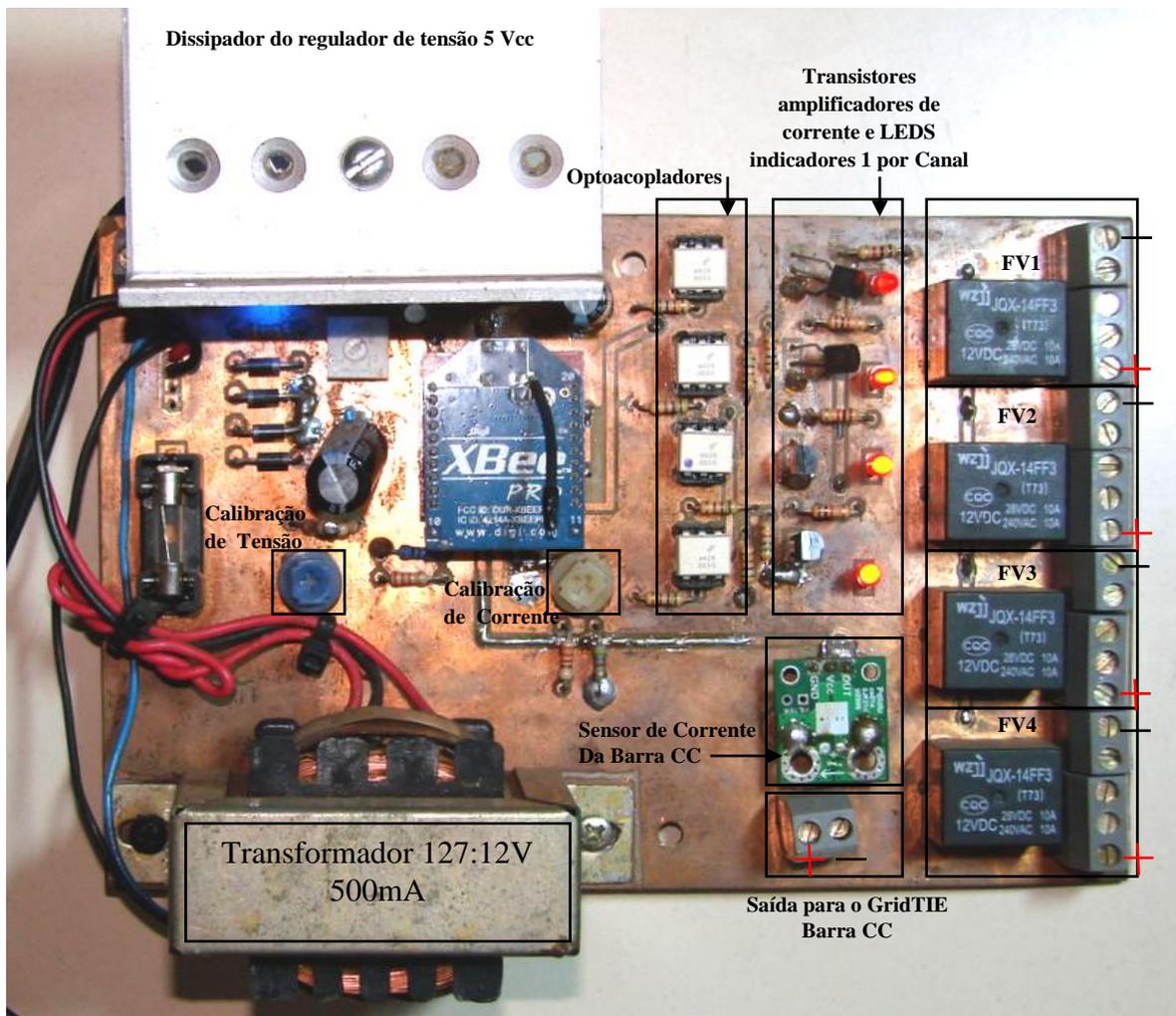


Figura 4.10 - Placa eletrônica do módulo de controle CC via módulo ZigBee - Xbee PRO.

A seguir descreve-se os componentes que compõem o circuito eletrônico do módulo de controle CC:

- Proteção entrada AC - Fusível de 500mA;
- Transformador da fonte de alimentação do módulo;
- Ponte de diodos retificadores converte AC em CC pulsante;
- Capacitor de 1000uF em paralelo com a saída dos diodos que retificam o sinal CC;

- Regulador de tensão 7805, estabiliza a tensão em 5Vdc para o circuitos dos optoacopladores e sensores;
- Circuito do LM317, ajustado para a tensão de 3,3Vdc para alimentação do módulo *Xbee*;
- Regulador de tensão 7812, regula a tensão em 12Vdc;
- Capacitores de 50uF, 150uF e 330uF filtros de ruído após o regulador de tensão;
- Dissipador de calor para o regulador de 12Vdc, evita a queima do componente por superaquecimento.
- Led sinalizador da fonte da placa azul = Ligado.
- Leitura de nível de tensão utilizando o método de divisor de tensão no secundário do transformador ajustável por resistor variável azul e envia o sinal via porta analógica do módulo *XBee*;
- Leitura de corrente da barra CC enviada ao *GRID TIE*, por meio do sensor de efeito *Hall* ajustável via resistor variável branco no circuito da placa verde com seta indicando o fluxo de corrente;
- Saída para o conversor é a somatória dos painéis conectados à barra CC e depois de passar pelo sensor de efeito *Hall* é conectada ao conversor *GRID TIE*;
- Optoacopladores têm a função de isolar opticamente, o circuito de potência (relés e cargas), do circuito de comando do módulo *XBee*, que é sensível e trabalha com um valor de tensão de 3,3Vdc enquanto os relés trabalham com 12Vdc. Evita também que transientes derivados do chaveamento dos relés interfiram no funcionamento do módulo que é microcontrolado;
- Transistores de acoplamento, utilizando 1 por canal para o ganho de corrente necessário para o fechamento da bobina do relé, no circuito da bobina tem-se um LED VERMELHO que indica quando o relé está fechado, e conecta o Painel à barra CC;
- Os sinais positivos VERMELHOS e negativos PRETOS indicam a polaridade na conexão dos painéis aos relés e em baixo na saída CC, que indica a polaridade para a conexão ao *GRID TIE*;
- Módulo de *ZigBee Xbee-PRO*, alcance máximo em visada direta de 1,5Km, permite o envio dos sinais de corrente e tensão captados nos circuitos da placa e também recebe o sinal digital de acionamento dos canais que conectam os painéis;
- Base (soquete), converte o distanciamento dos pinos do *XBee* para o padrão convencional.

Na programação interna do módulo *Xbee* utiliza-se topologia de comandos AT¹⁹, para os comandos do presente protótipo, pois traz a informação remota dos sensores em tempo real para o módulo coordenador, que é o centro do sistema, no micro controlador ATmega328 ocorre o processamento dos sinais. Adotou-se este procedimento, pois o presente protótipo é de conceito simples e facilita a fase de desenvolvimento inicial, em uma continuação do presente estudo, pode-se configurar os módulos *Xbee-Pro* para trabalharem com protocolos de comunicação com cabeçalhos e endereçamentos com *frame* de dados padrão RS232 (8-N-1), no modo API com tecnologia que suporta redes MESH, permitindo o gerenciamento de uma grande rede de módulos de controle CC com um único coordenador (MESSIAS, 2011).

4.1.4 – Protótipo do módulo coordenador

Após realizações de pesquisas sobre os diversos tipos de comunicação para o módulo coordenador, encontra-se a tecnologia *ZigBee* que já é robusta e sofisticada o suficiente para o estabelecimento de protocolos de segurança e confiabilidade, é muito comum supor que a tecnologia de comunicação de dados via rede elétrica, seria indicada neste caso, mas no estado atual da arte da tecnologia *internet* via rede elétrica (*narrowband power line communications*)-NB-PLC ITU-T G.9955 (ITU, 2011), ainda não se tem as facilidades que já se possui nas redes MESH.

Com a comunicação por RF não se precisa de meio físico (fios) o que é muito interessante uma vez que a comunicação por fio energizado pode ser interrompida numa falta elétrica (disjuntores) e se perde a comunicação com o módulo de controle CC ficando sem referências. Na figura 4.11, descreve-se o esboço do módulo coordenador do protótipo do módulo coordenador.

¹⁹ Método de programação da comunicação dos módulos Zigbee (MESSIAS, 2011).

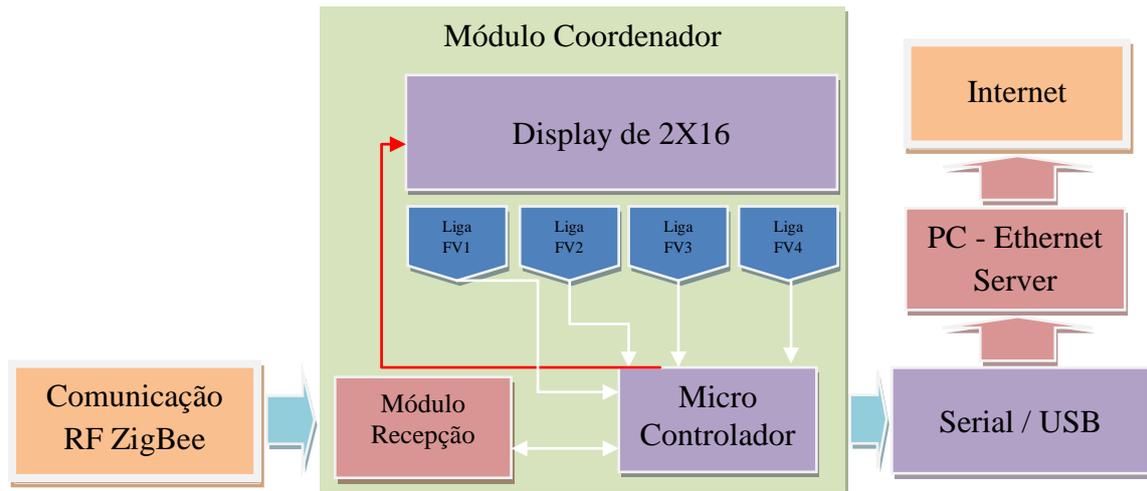


Figura 4.11 - *Módulo coordenador diagrama funcional.*

O módulo de coordenador tem a função de gerenciar e transmitir informações da geração dos painéis fotovoltaico, por meio do kit *ZigBee Xbee-PRO*, obtém-se as informações dos sensores de corrente e de tensão que são encaminhados ao Arduino.

O circuito das chaves acionam à distância os painéis que devem gerar energia, numa simulação da decisão de um centro de despacho de geração CDGD, estes comandos são monitorados pelo algoritmo de controle de pode intervir desconectando o painel mesmo que esteja habilitado pela chave.

O visor de LCD traz informações em tempo real, por meio do qual pode-se interagir com as chaves e observar o comportamento do processamento do micro controlador. Além disso, observa-se em tempo real o incremento de corrente na barra quando são conectados os painéis.

O módulo coordenador também exporta estas informações em formato digital em tempo real via comunicação serial RS-232, que é recebida em um microcomputador ou um servidor de rede apropriado como o DRV (INTELBRAS, 2012), que hospeda um site, e fornecem todas estas informações *online* via *web* com senha de acesso restrito.

- 1 KIT Arduino UNO com ATmega328;
- 1 Módulo *ZigBee XBee* - PRO. Com Alcance de até 1,5Km em visada direta sem obstáculos com o uso de antenas externas.

O *Display* de LCD, têm diversos pinos que devem ser conectados corretamente ao ARDUINO (microcontrolador ATmega328), esta conexão deve ser acompanhada de uma programação específica no algoritmo para inicializar o LCD da forma considerada, sendo importante notar a pinagem do LCD na figura 4.13.



Figura 4.13 - *Pinagem do display de LCD.*

Como o Arduino é um módulo padronizado, é possível adquirir componentes desenvolvidos para o mesmo como as conexões entre os pinos *Wings* para Arduino Uno, que facilita a conexão de fios ao kit. O protótipo do módulo coordenador poderia ser desenvolvido com qualquer microcontrolador compatível, podendo ser da linha PIC. Mas opta-se pelo Arduino UNO, devido às facilidades encontradas neste kit, como a fonte regulada de alta qualidade de 5Vdc para o LCD e 3,3Vdc para o kit *ZigBee*, baixo custo e alta *performace*. Pode-se contar também com uma linguagem já bem explorada e de

²¹É uma plataforma de hardware livre (*open source*), projetada utilizando-se um microcontrolador Atmel ATmega328, com suporte de entrada/saída embutido e fontes reguladas de 3,3V e 5V uma linguagem de programação padrão, tem origem em *Wiring*, que é essencialmente C/C++. Prevê a padronização e utilização *Shields* (periféricos), de acordo com o interesse do programador (ARDUINO, 2012).

domínio público o C++, sua programação é simples com diversos exemplos publicados na *internet* (ARDUINO, 2012). Na figura 4.14 apresenta-se o módulo coordenador montado.

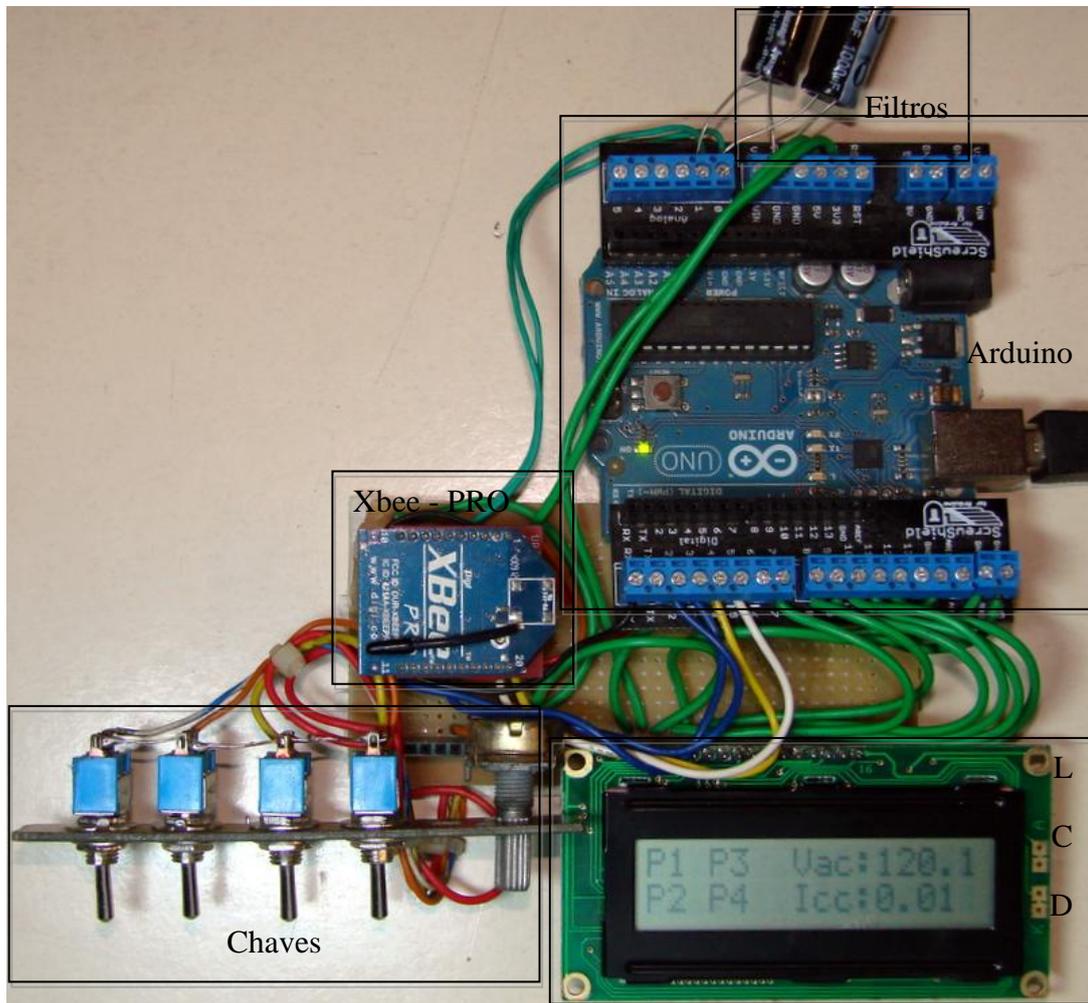


Figura 4.14 - Módulo coordenador composto por kit Xbee-PRO com Arduino UNO-ATmega328 chaves e Display.

Os capacitores de 1000uF, utilizados para estabilizar o sinal analógico oriundo do kit Xbee o potenciômetro ao lado do *display* serve para o controle de contraste do *display* de LCD. Uma importante característica do kit Arduino UNO é a comunicação serial RS-232 e o sincronismo via *interface* USB que o torna muito interessante e prático para o uso com os computadores modernos.

4.1.5 – Custo da construção dos protótipos

Os custos levantados baseiam-se nos protótipos aqui desenvolvidos, portanto para um sistema de 400W. Os valores não devem ser utilizados para cálculos em escala maior, pois representam valores de protótipo e não valor de produto final produzido em escala onde considerável parte dos custos é reduzido, apresentado na Tabela 4.1. (SHENZHEN TECHNOLOGY, 2012)

Tabela 4.1 - Custos de componentes para o desenvolvimento dos protótipos.

Módulo de controle CC – ZigBee XBee – Pro		Módulo coordenador		Conversor GRID TIE	
Descrição	Valor	Descrição	Valor	Descrição	Valor
01 Kit ZigBee Xbee – Pro	R\$150,00	01 Kit ZigBee Xbee – Pro	R\$ 150,00	02 GRID TIE 200W	R\$ 500,00
Componentes eletrônicos diversos	R\$150,00	01 Kit Arduino UNO	R\$ 100,00	Total	R\$ 500,00
Acondicionamento	R\$ 50,00	Componentes eletrônicos diversos	R\$ 100,00		
01 Placa de Circuito Impresso	R\$100,00	Acondicionamento	R\$ 50,00		
Total do protótipo	R\$ 450,00	Total do protótipo	R\$ 400,00		
Total Geral R\$ 1.350,00					

4.1.6 – Programação dos dispositivos ZigBee XBee-PRO

As características principais de pinos, funções dos módulos, a escolha de quais pinos utilizar, está ligada à sua capacidade de operação. Que é determinada pelo fabricante em detalhes no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Pinos do módulo ZigBee suas respectivas funções.

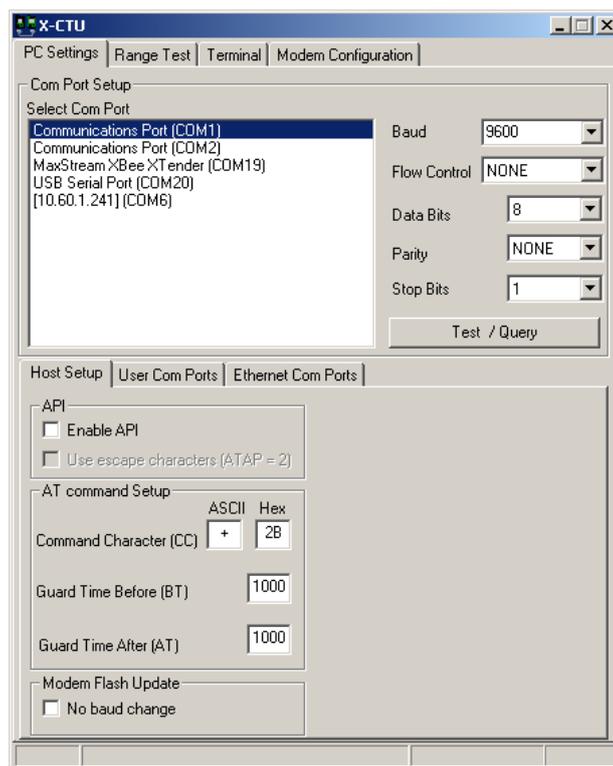
Pino #	Nome	Direção	Padrão	Descrição
1	VCC	-	-	Fonte de alimentação
2	DOUT	saída	saída	UART Saída de dados
3	DIN/CONFIG	Entrada	Entrada	UART Entrada de dados
4	DIO12	Ambos	Desabilitado	Digital VO 12
5	RESET	Ambos	Coletor aberto com subida	Module Reset (Pulso de reinício deve ter 200 ns)
6	RSS PWM/DIO10	Ambos	saída	RX indicador de largura de sinal Digital IO
7	DIO11	Ambos	Input	Digital VO 11
8	[Reserva]	-	Desabilitado	Não conecte
9	DTR/SLEEP_RQ/	Ambos	Input	Pino de suspensão e controle de linha

Pino #	Nome	Direção	Padrão	Descrição
	DIO8			ou entrada/ saída Digital 8
10	GND	-	-	Aterramento
11	DIO4	Ambos	Desabilitado	Digital VO 4
12	CTS/DIO7	Ambos	Saída	Limpa para enviar controle de fluxo ou Digital VO 7.CTS, se habilitado, é uma saída.
13	ON/SLEEP	Saída	Saída	Indicador do estado do módulo ou Digital VO 9
14	VREF	Entrada	-	Não é usado para for EM250. Usado para programar um segundo processador. Para compatibilizar com outros módulos XBEE , recomenda-se conectar esse pino de tensão se é desejável amostragens analógicas. Ou então, conecte ao GND.
15	Associativo/DIO5	Ambos	saída	Indicador de associação. Digital VO 5
16	RTS/DIO6	Ambos	Entrada	Solicita envio de controle de fluxo, Digital VO 5, RTS, se habilitado é uma entrada.
17	AD3/DIO3	Ambos	Desabilitado	Entrada analógica 3 ou Digital VO 3
18	AD2/DIO2	Ambos	Desabilitado	Entrada analógica 2 ou Digital VO 2
19	AD1/DIO1	Ambos	Desabilitado	Entrada analógica 1 ou Digital VO 1
20	AD0/ DIO0 /	Ambos	Desabilitado	Entrada analógica 0, Digital IO 0

Fonte: DIGI. *Software Downloads. X-CTU Software*, 2012. Disponível em: <<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>>. Acesso em: 10 fev. 2012 (modificado).

Estes módulos são programáveis via utilitário X-TCU do próprio fabricante, que permite personalizar algumas das várias configurações internas. (DIGI, 2012)

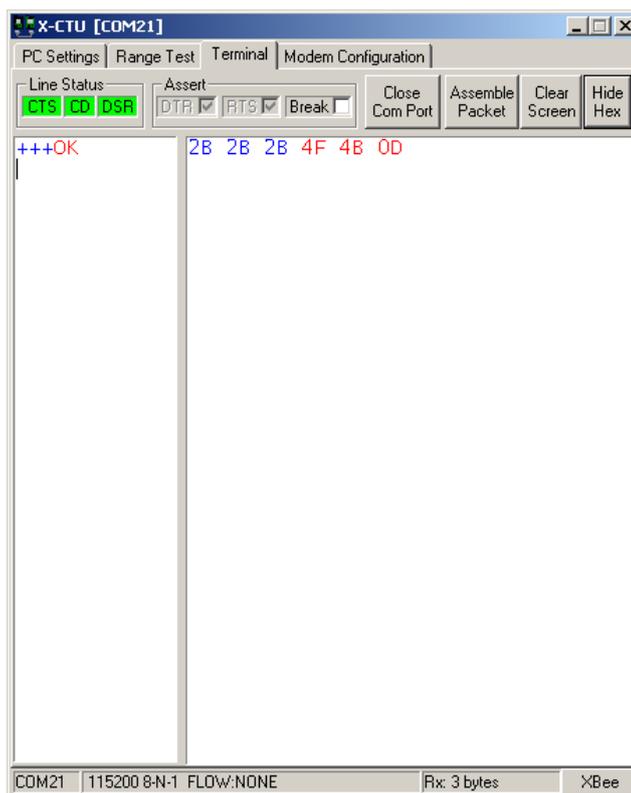
Por meio de uma *interface* que sirva de base como a placa INT700 o kit *ZigBee* pode se comunicar via porta serial USB com o computador, preferencialmente com a utilização de chip de conversão USB/Serial, tal como o FT232R ou PL-2303. Seleciona no X-CTU, e a porta de comunicação COM que o periférico assumiu ao se conectar, assim como na Figura 4.15.



Fonte: DIGI. *Software Downloads. X-CTU Software*, 2012. Disponível em: <<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

Figura 4.15 - Tela de acesso ao Módulo ZigBee.

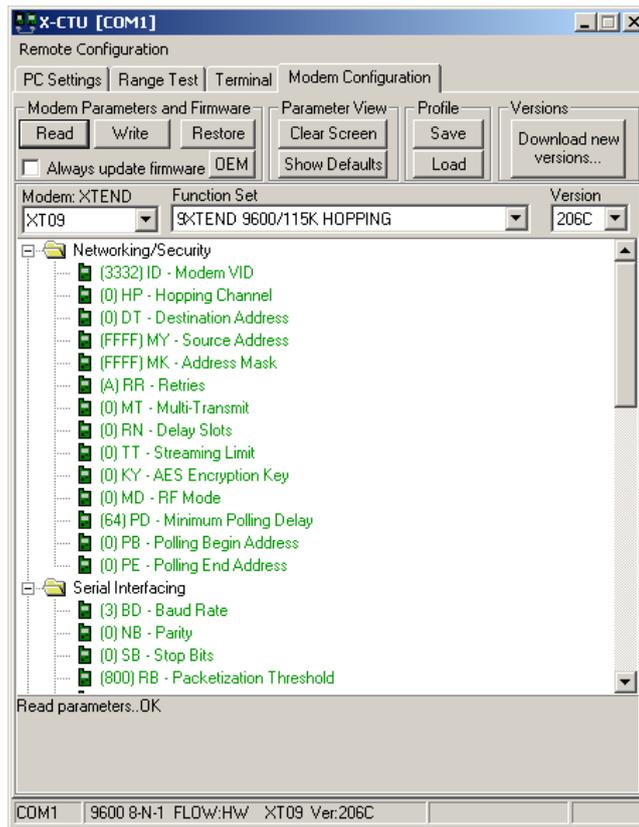
O programa fornecido pelo fabricante do módulo de forma gratuita permite testar a comunicação entre módulos, testar a perda de pacotes de comunicação entre módulos distantes, assim como uma janela de terminal para configurações rápidas via comandos AT, antigos conhecidos em telefonia, Figura 4.16.



Fonte: DIGI. *Software Downloads. X-CTU Software*, 2012. Disponível em: <<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

Figura 4.16 - Tela do programa X-CTU, com detalhe do terminal de comandos AT.

Além destas opções, é possível configurar o modem trabalhar com dispositivo final (*end device*), como roteador (*router*), ou coordenador (*coordinator*), outras configurações podem ser feitas para habilitar protocolos ATM ou até mesmo convertê-lo em dispositivo de rede MESH por meio da janela *Modem Configuration*, apresentado na Figura 4.17.



Fonte: DIGI. *Software Downloads. X-CTU Software*, 2012. Disponível em: <<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

Figura 4.17 - Janela de Configuração do módulo ZigBee.

Para se realizar uma configuração correta é preciso certificar-se do modelo e versão do dispositivo que se está utilizando. Na Figura 4.18 ilustra-se a resposta com a informação do modelo detectado no *Com Test*. Torna-se interessante a anotação deste valor, pois representa o módulo conectado para que não configure um tipo ou modelo de dispositivo diferente (FALUDI, 2010).



Fonte: DIGI. *Software Downloads. X-CTU Software*, 2012. Disponível em: <<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

Figura 4.18 - *Modem atual.*

De posse desta informação, pode-se acionar o botão *read*, caso o programa perceba que está defasado, com a *internet* disponível, permite-se a atualização automática da lista de modelos de modem. Terminada esta fase, o modem mostrará as configurações atuais (MESSIAS, 2011).

4.1.7 – Programação do Arduino UNO

A programação do kit Arduino, que compõe o módulo coordenador é em linguagem C++, desenvolvida em código *open-source*, amplamente discutida pela comunidade que desenvolve protótipos, na Figura 4.19 apresenta-se o trecho do código no ambiente computacional Arduino 1.0 fornecido pelo desenvolvedor do kit arduino UNO (ARDUINO, 2012).

```
m_dulo_coordenador | Arduino 1.0
File Edit Sketch Tools Help

m_dulo_coordenador

#include <LiquidCrystal.h> // Incluir biblioteca de referências do Display LCD
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12); //Define os pinos de conexão do LCD
int P1 = 2; //Declaração de variável
int P2 = 3; //Declaração de variável
int P3 = 4; //Declaração de variável
int P4 = 5; //Declaração de variável
floatVac = 0; //Declaração de variável
floatSVac = 0; //Declaração de variável
floatIcc = 0; //Declaração de variável
floatSIcc = 0; //Declaração de variável
void setup() { //Inicia seção de configuração
  Serial.begin(9600); //inicia porta serial com 9600 bauds
  lcd.begin(16, 2); //Inicia LCD
  pinMode(P1, INPUT); //Define P1 como entrada
  pinMode(P2, INPUT); //Define P1 como entrada
  pinMode(P3, INPUT); //Define P1 como entrada
  pinMode(P4, INPUT); //Define P1 como entrada
}
void loop () { //Inicia seção
  if (digitalRead(P1)==HIGH) { //Aciona P1 via ZigBee caso atenda as condições de segurança
    Serial.print("P1 On "); //Imprime na porta serial P1 ON
    lcd.setCursor(0,0); //Posiciona cursor em posição 0,0 do LCD
    lcd.print("P1"); //Escreve P1
  }
  else { //Caso contrário
  }
}

Done Saving.
The sketch name had to be modified. Sketch names can only consist
of ASCII characters and numbers (but cannot start with a number).
They should also be less less than 64 characters long.

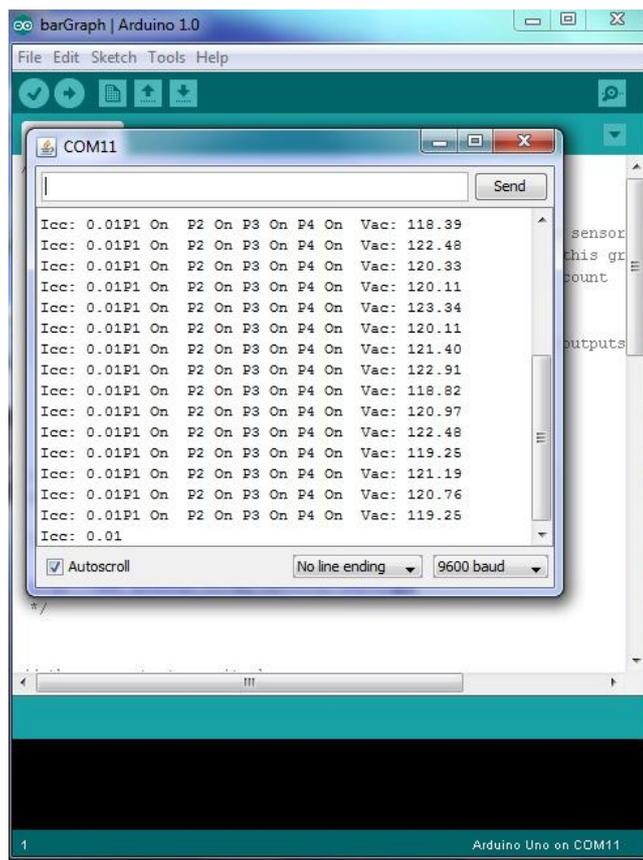
20 Arduino Uno on COM3
```

Fonte: ARDUINO. *For information on the development of Arduino. Arduino is an open-source electronics prototyping platform based on flexible arquitetura*, 2012. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 06 Maio 2012.

Figura 4.19 - Software de programação C++ para Arduino.

Outra característica muito interessante desta plataforma de programação é a capacidade de gravar o módulo na mesma placa onde é executado, pois possui *bootloader*, chip que permite a gravação do programa na placa de utilização sem a necessidade de *hardware* externo (ARDUINO, 2012).

A plataforma do Arduino permite monitorar sensores ou pinos via comunicação serial RS-232. Para tanto, utiliza-se o monitor serial, apresentado na Figura 4.20. Percebe-se que os sinais dos estados dos painéis já são visualizados na comunicação serial do módulo coordenador para o computador via cabo USB.



Fonte: ARDUINO. *For information on the development of Arduino. Arduino is an open-source electronics prototyping platform based on flexible arquitetura*, 2012. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 06 Maio 2012.

Figura 4.20 - Software de programação C++ para Arduino.

Além disso, este sinal serial pode ser recebido por um servidor *internet*, que nos dias atuais pode estar em um equipamento denominado DVR (INTELBRAS, 2012), e hospedar um site para fornecer as informações e receber os comandos do centro de despacho da geração distribuída, podendo ser definido em trabalho posterior, o servidor para circuito privado de vigilância eletrônica.

O *Digital Video Recorder-CFTV* DVR pode hospedar a página *web*, assim como câmeras de monitoramento, bastando para isso que no local exista um canal de comunicação ADSL convencional com a *internet*.

4.2 - ENSAIO DOS PROTÓTIPOS E INSTALAÇÕES

Após construção dos módulos de controle CC e o módulo coordenador, procede-se às simulações e ensaios de carga e funcionamento. Também foram feitas instalações dos painéis fotovoltaicos em suporte para o ensaio do sistema completo, com caixa externa para abrigar o módulo de controle CC.

4.2.1 – Instalação dos painéis e módulo de controle CC.

Instalou-se no laboratório de antenas do IFMT os equipamentos dos ensaios, utilizou-se equipamentos do laboratório de fontes alternativas de energia do campus Cuiabá e Departamento da Área de Eletro Eletrônica-DAEE com apoio do programa MINTER UNB/IFMT. Os painéis solares e o suporte para os mesmos são parte do patrimônio do IFMT-DAEE e pertencem ao laboratório de fontes, que fica à disposição de pesquisas, como o presente trabalho, verifica-se a instalação completa na Figura 4.21.



Figura 4.21 - *Instalação completa do módulo de controle CC, conversores GRID TIE, medidor de energia.*

Como utiliza-se painéis de 75W, pode-se utilizar um painel por canal do protótipo do módulo de controle CC. Considerando os quatro canais a potência máxima pode atingir $4 \times 75 = 300$ W. Apesar de o conversor ter capacidade de 200W pode-se ligar os quatro painéis, pois o mesmo tem controle eletrônico e limita a geração em 200W. Como o

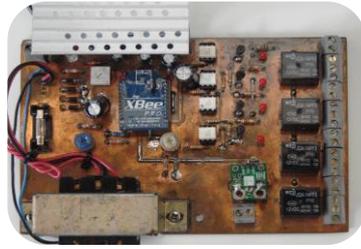
objetivo do ensaio neste momento é o módulo de controle CC apresentado na Figura 4.22, não há necessidade de totalização da energia gerada ou a necessidade de aproveitamento máximo da capacidade de geração dos painéis, pois o objetivo é o ensaio do controle CC.



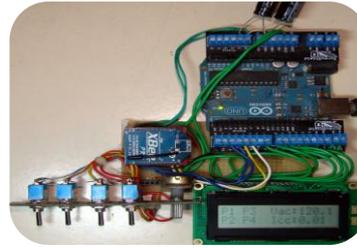
Figura 4.22 - Detalhe do módulo de controle CC, conversores GRID TIE instalados e medidor de energia com todos os canais ativados.

4.2.2 – Ensaio do módulo de controle CC e do módulo coordenador

A Figura 4.23 apresenta os módulos testados em condições normais de operação, instalado junto aos painéis fotovoltaicos do laboratório de antenas no terraço de antenas do IFMT DAEE em dias ensolarados.



Módulo de
Controle CC



Módulo
Coordenador

Figura 4.23 - Módulos testados (Protótipos).

Quanto ao funcionamento dos módulos, testou-se o alcance e a capacidade do chaveamento e outros aspectos:

- Alcance máximo atingido depende muito dos obstáculos, em ambiente confinado, o módulo perde muito alcance, dependendo do número de paredes que o sinal atravessa, mas como esta comunicação entre os módulos é para o ambiente externo não se teve dificuldade de alcançar sucesso até 100 metros com as antenas convencionais dos módulos, mas com o acoplamento de antenas externas esta realidade muda muito, reforça-se que o limite é de 1,5km com antenas em visada direta;
- Quanto à capacidade de corrente dos canais dos painéis, o dispositivo que responde é a capacidade de condução do relé, como se limita a 100W por relé o circuito se comportou normalmente nos ensaios com os painéis atingindo o máximo de aproximadamente 62,3VA por painel para o sol das 15:00hs;
- Quanto à segurança na comunicação pode-se verificar que, caso o sinal entre o módulo de controle CC e a módulo coordenador seja perdido, o módulo do controle CC é desligado, interrompendo toda a geração automaticamente. No caso do reestabelecimento do sinal a geração retorna normalmente ao estado anterior;
- Com a ativação dos canais o nível de potência total entregue ao conversor aumentou proporcionalmente ao valor de potência das contribuições individuais de cada painel como esperado.

Apresenta-se a seguir uma sequência de aumento de nível de potência injetada na rede de acordo com a ativação dos painéis pelo módulo controlador CC, Figura 4.24.

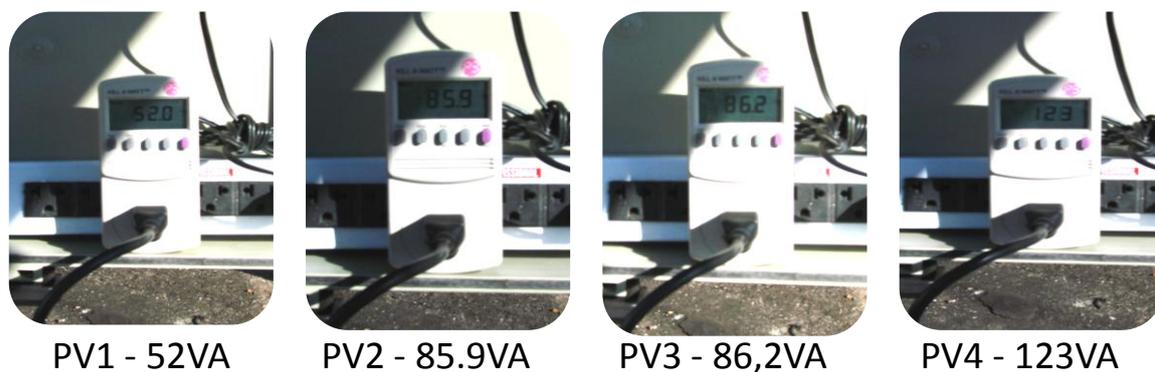


Figura 4.24 - Aumento de geração conforme o acionamento das chaves no módulo coordenador.

Nos ensaios percebeu-se que o painel 3 estava danificado com o circuito aberto entre as células individuais que o compõe, o fato pode ser observado quando aciona-se o canal PV3 e o nível de potência não aumenta, observou-se que via controlador CC pode-se verificar remotamente uma irregularidade no painel, portando o módulo controlador CC torna possível a identificação do problema, sem este módulo o painel permaneceria danificado sem ser percebido.

Continuando o ensaio anterior lê-se os valores de tensão e corrente no módulo coordenador à distância, e se obtém os valores conforme a Figura 4.25.

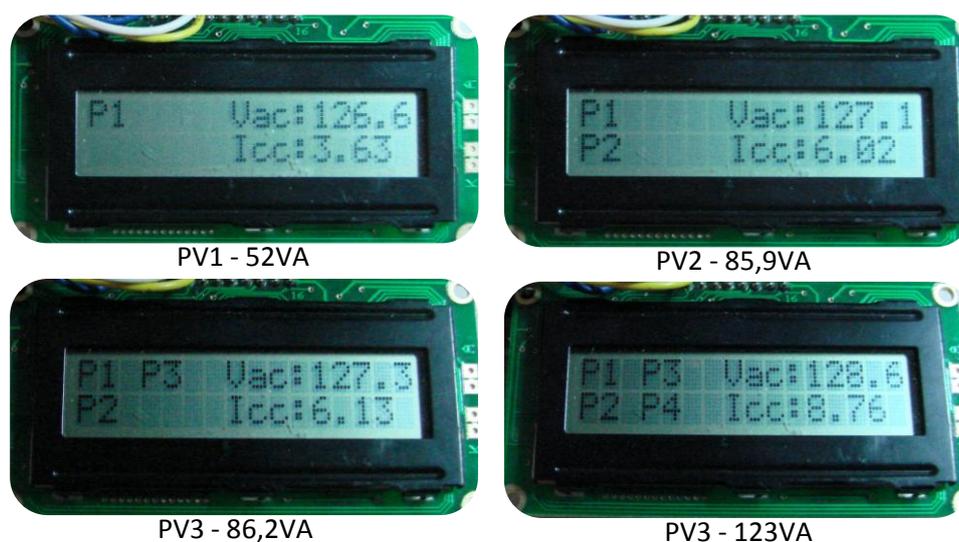


Figura 4.25 - Aumento de geração conforme o acionamento das chaves no módulo coordenador.

Percebe-se que o aumento de tensão no circuito CA nos ensaios com os painéis solares não é suficiente para atingir os níveis limítrofes de controle, da forma citada, todos os painéis entraram em operação. Como o ponto de conexão dos painéis tem um nível de tensão de aproximadamente 126,5Vac, os incrementos não chegam ao valor limítrofe inicial, que é 131,4 Vac. Para os testes de bloqueio de geração em função do nível de tensão e limites de corrente, realizaram-se ensaios do algoritmo com a substituição dos sensores por divisores de tensão com potenciômetros.

4.2.2.1 – Controle de estabilidade do nível de tensão e corrente de barra CC no ponto de conexão

Em breve resumo, por meio da conexão e desconexão dos painéis de acordo com o algoritmo de controle no apêndice A. O algoritmo limita a operação em níveis de tensão seguros, e também, trabalha-se com instâncias de permissão de geração dentro do estabelecido pela concessionária de energia de acordo com planejamento ou demanda, por geração em determinado momento, podendo inclusive estar em contato direto com o controle da concessionária, via supervisão à distância. Com os resultados na Figura 4.26.



Figura 4.26 - Desligamentos de painel por nível de tensão proteção do algoritmo de controle

O algoritmo monitora o nível de tensão e caso a mesma esteja em nível crítico a partir de 1,035 pu da tensão nominal que é 127 V, começa-se a desconectar painéis até que o nível de tensão esteja dentro dos valores especificados, verificam-se os níveis de desconexão no Gráfico 4.1. Quando é solicitada a conexão de mais um painel, e o nível de tensão não permite, o algoritmo de controle por meio do microcontrolador bloqueia e informa que o nível de tensão máximo foi atingido.

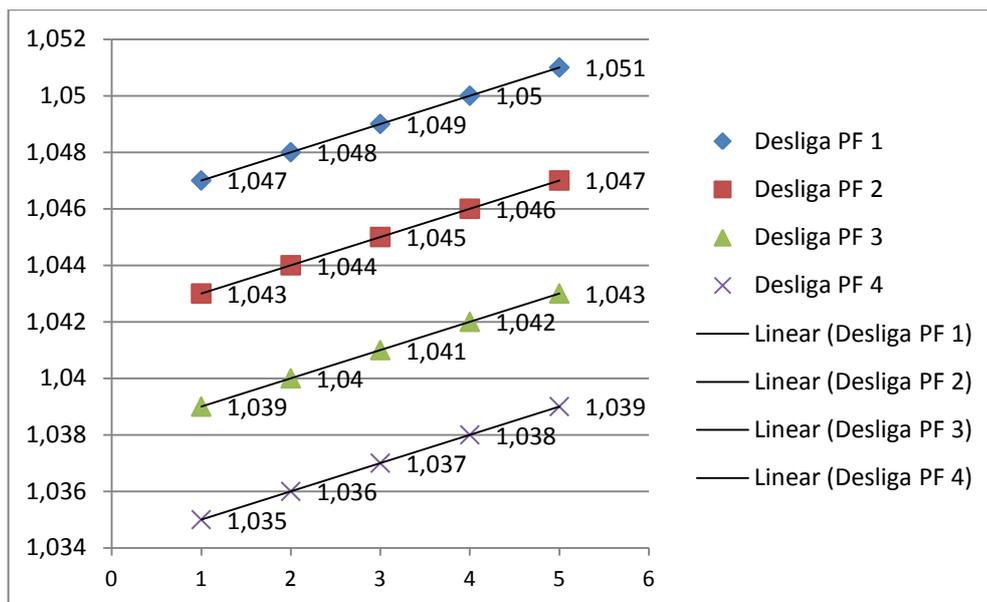


Gráfico 4.1 - Gráfico Limítrofe de tensão de acordo com a conexão dos painéis e a potência injetada, com precisão de 0,001 do mínimo ao máximo.

A leitura que se deve fazer do gráfico é que conforme o nível de tensão em pu aumenta atinge-se as barras transversais que representam os painéis no gráfico, que são desconectados automaticamente, de forma que para um nível de tensão acima da barra transversal todos os painéis são desconectados, caso o valor de tensão retorne à normalidade os painéis são conectados novamente, apresentado na Figura 4.27.



Figura 4.27 - Desligamentos de painel por nível de corrente no barramento CC, proteção do algoritmo de controle.

Como a injeção de potência de painéis fotovoltaicos em alimentadores de distribuição radial está limitado à capacidade de transporte dos cabos da baixa tensão apresenta-se o Gráfico 4.2, para manter o nível de segurança estabelecido em norma técnica para os condutores.

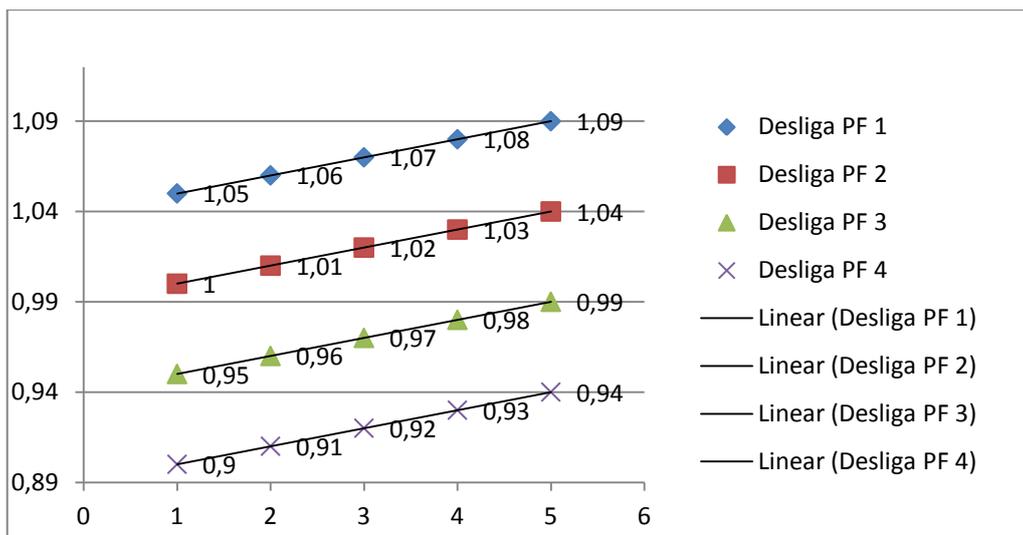


Gráfico 4.2 - Desconexão dos painéis por limite de corrente, com precisão de 0,01 do mínimo ao máximo.

Similar ao sistema de conexão anterior quando o aumento de corrente toca nas barras que representam os painéis desconectados até que o nível de corrente estabelecido seja corrigido, trabalhando em lógica OU, entre tensão OU corrente qualquer um dos fatores desconecta os painéis FV em caso de situação limítrofe. Quanto ao controle de despacho do CDGD verifica-se a Figura 4.28.



Figura 4.28 - Desligamentos de painel por falta de autorização da concessionária, bloqueio por chaves do algoritmo de controle à distância.

No ponto de conexão, quando ocorre um aumento do nível de tensão com a injeção de potência, a concessionária de energia necessita limitar +5% do valor nominal 127Vac atingindo no máximo o valor de 133,35 Vac, acima deste limite a geração deve estar desconectada, com o objetivo de auxiliar a estabilidade do sistema elétrico e também quanto ao critério da corrente, proteger os equipamentos de cabos desconectando-se quando em sobrecorrente, depois desta revisão confirma-se que este método resolveu na

prática este controle de despacho e os critérios de proteção quanto aos limites de corrente e tensão.

4.2.3 – Ensaios do Conversor de Energia *GRID TIE*

Analisando-se o conversor *GRID TIE* quanto à qualidade da energia injetada na rede, montou-se a seguinte experiência em laboratório de fontes alternativas de energia, Figura 4.29:



Figura 4.29 - Esquema montado para a experiência de qualidade da energia.

Na simulação dos painéis fotovoltaicos em laboratório, utiliza-se 02 baterias de 12Vdc e 60A, por terem a mesma faixa de tensão contínua de energia CC. Caso utilizasse painéis, as leituras de eficiência do *GRID TIE* estes dependeriam de fatores ambientais. Como o foco nestes ensaios é o *GRID TIE* pode-se substituir os painéis fotovoltaicos.

Utilizou-se o analisador de energia de fabricação da Minipa modelo, ET-5060C-1102 para verificar a qualidade de energia injetada na rede (MINIPA, 2012). Figura 4.30.



Fonte: MINIPA. Fornece instrumentos de medição. **Analizador de Energia Modelo ET-5051C**, 2012. Disponível em: <http://www.minipa.com.br/Caracteristicas.aspx?ID_Sub_Categoria=6&ID=498>. Acesso em: 07 jul. 2012.

Figura 4.30 - Analisador de energia ET-5060C-1102 utilizado nos ensaios.

Informações técnicas do modelo ET-5060C-1102 podem ser encontrados no anexo C. Com o circuito montado, obteve-se o sinal de tensão e corrente conforme a Figura 4.31.

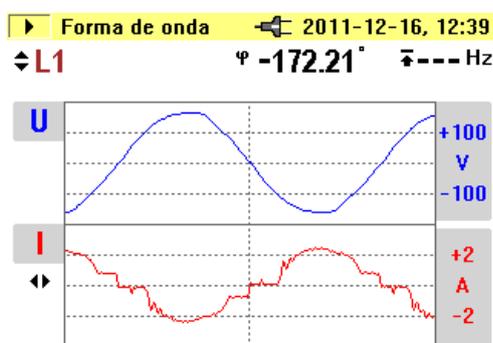


Figura 4.31 - Forma de onda no tempo do sinal injetado na rede no domínio do tempo.

Observa-se distorção no sinal de corrente, apesar do sinal de tensão estar muito próximo do ideal. Investiga-se a seguir a distorção harmônica dos sinais apresentados, Figura 4.32.

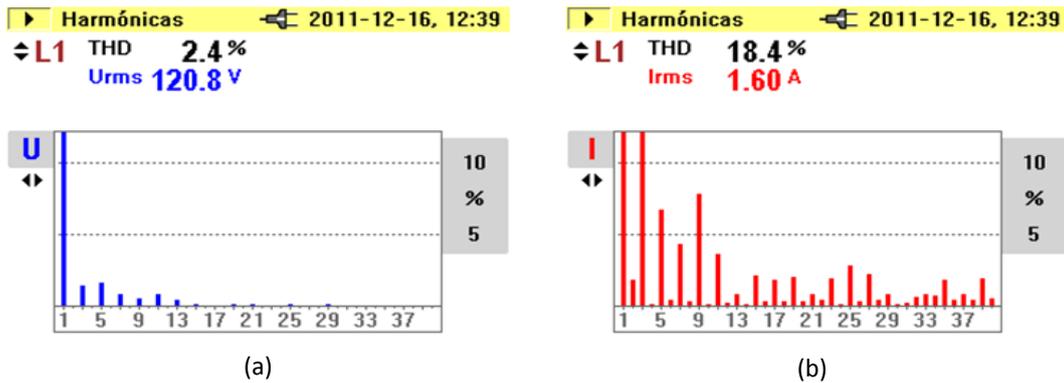


Figura 4.32 - Conteúdo harmônico do conversor *GTI GRID TIE*: (a) Harmônicas de tensão no domínio da frequência; (b) Harmônicas de corrente no domínio da frequência.

É importante ressaltar que, como o sinal senoidal da tensão é sincronizado automaticamente pelo circuito inteligente, a distorção harmônica total de tensão tem características inerentes à rede ao qual é conectada, já a distorção harmônica total de corrente com maior valor de distorção depende do estado da arte do circuito de tiristores no chaveamento e do acoplamento magnético conseguido na etapa de saída por parte dos toróides de ferrite para altas frequências de chaveamento que formam a onda de corrente (FRANCHI, 2008).

Comparando-se a qualidade de energia proveniente do conversor *GRID TIE* a uma carga resistiva no mesmo ponto de conexão, monta-se a experiência, conforme demonstra a Figura 4.33:

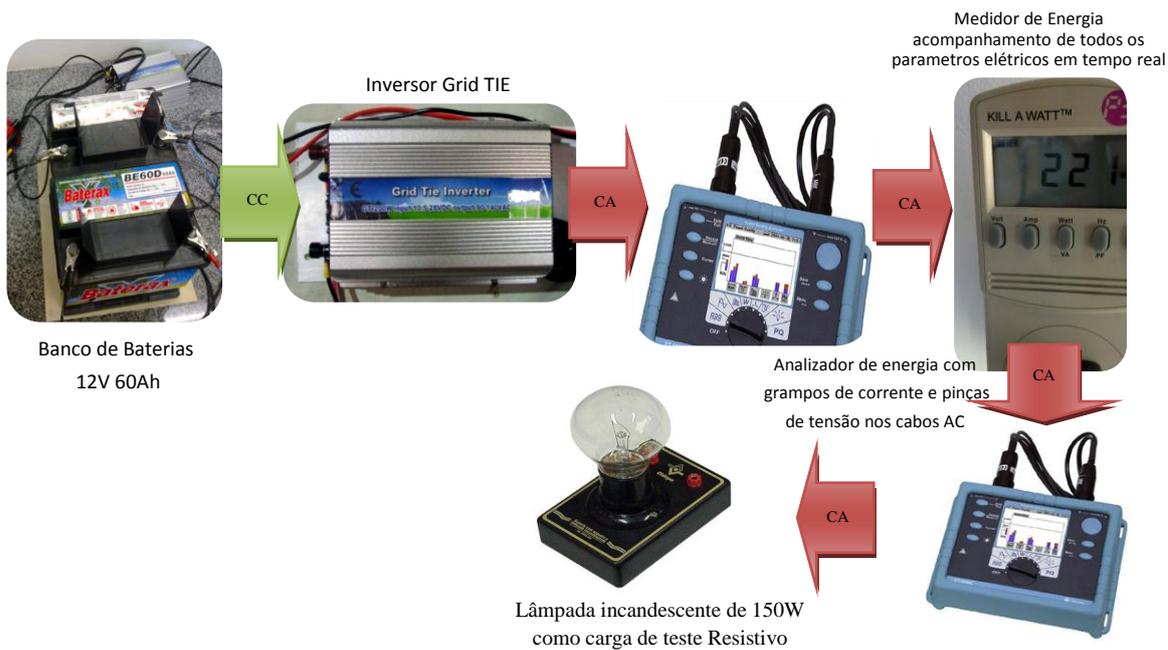
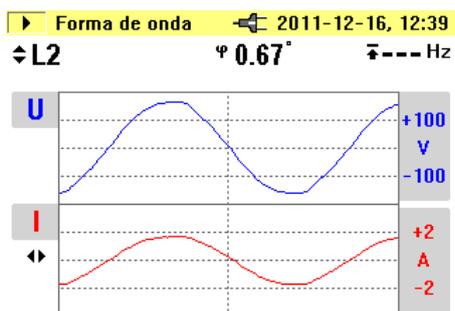


Figura 4.33 - Diagrama montado com lâmpada em paralelo com a tomada, valores para comparação.

Comparando-se o sinal medido no mesmo circuito elétrico para cargas resistivas no caso de uma lâmpada de 150W, tem-se os seguintes valores de distorção, Figura 4.34.



(a)

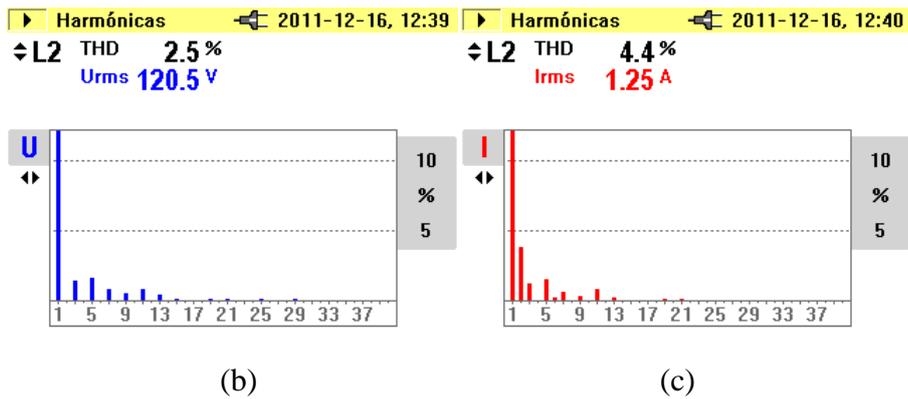


Figura 4.34 - Sinal de Carga Resistiva e Harmônica: (a) Sinal de tensão e corrente no domínio do tempo; (b) Harmônicas de tensão no domínio da frequência; (c) Harmônicas de corrente no domínio da frequência.

Como se pôde verificar, mesmo com cargas paralelas ligadas em mesmo circuito CA, e apesar de a distorção harmônica total de corrente injetada ser de aproximadamente 18.4% na carga ligada em paralelo no mesmo circuito de baixa tensão, não há aumento significativo da distorção harmônica total de corrente, que permanece em 4.4% no ramal que atende a carga. Sendo este característico do sistema elétrico acessado.

Com esta experiência percebe-se que a inclusão de 18% de distorção harmônica total não interfere no sistema mesmo que em paralelo no ponto de conexão, isto se deve à capacidade de suprimento extra de energia de um sistema conectado, em pontos da onda que está sincronizada com o sinal da rede, este tende a aproximar-se ao sinal senoidal fundamental proveniente da concessionária, assim ela se “auto-regula” ao sistema e encontra-se a distorção harmônica total de corrente 4,4% bem mais baixo no ramal da lâmpada.

Nos ensaios realizados com o sinal SPWM, existe uma tendência grande de não perturbar o sistema elétrico, são previstas harmônicas, mas é necessário notar que esta influência depende da quantidade de potência injetada no sistema, geralmente, comparando-se com a quantidade de energia disponível no sistema elétrico da concessionária, o acréscimo de harmônicas é reduzido.

Analisando-se o sinal da saída do conversor na forma de onda da corrente da Figura 4.34 (a), pode-se perceber distorções típicas dos circuitos de chaveamento eletrônico, como a crista no pico da senoíde, que caracteriza o chaveamento, percebe-se também, que no efeito da passagem por regiões próximas ao zero, são justamente os pontos mais críticos de um chaveamento SPWM, mesmo após o filtro passa baixas com frequência de corte acima e 50/60 Hz (filtro LC, 2mH, 20 μ F).

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Devido ao avanço da tecnologia na construção de painéis fotovoltaicos, tem-se reduzido o custo do painel historicamente, sendo que a energia solar fotovoltaica já atingiu competitividade econômica. É ponto de grande urgência a necessidade de encontrar soluções técnicas que viabilizem esta tecnologia, para que, os antigos modelos de rede orientados da fonte geradora ao consumidor, possam migrar de forma segura e eficiente para um modelo de rede mais eficiente e inteligente “*SmartGrid*”.

Espera-se que o presente estudo incentive o incremento no uso de GDFV, que na instalação destes equipamentos permita-se a inclusão de mais consumidores ao sistema conectado FV. Desta forma o consumidor pode ter um entendimento melhor da quantidade de energia consumida e perceber as consequências deste consumo. Entende-se que participando ativamente da geração os consumidores terão a possibilidade e experimentar as suas dificuldades e disponibilidades no meio ambiente que os cerca, assim espera-se contribuir no sentido de evitar desperdício e promover um uso racional da energia.

Para esta realidade se tornar possível são necessárias mudanças no sistema elétrico atual, com a nova regulamentação aprovada pela ANEEL, ainda é preciso que as concessionárias de energia flexibilizem o sistema de cobrança, onde troca-se o medidor padrão pelo medidor de quatro quadrantes para permitir a medição nos dois sentidos. Com o novo medidor pode-se aferir a energia consumida e a gerada, permitindo ao consumidor pagar ou acumular a diferença para consumo posterior.

Para tanto, é preciso aplicar novos conceitos e quebra tabus no setor elétrico, como também a atualização da tecnologia de controle do sistema conectado para que se utilizem os métodos descritos de controle da energia gerada, dando permissão em tempo real através de equipamento automático sem a intervenção do consumidor final.

Estes estudos podem incluir os consumidores pessoa física, pois o sistema é automático e gerenciado a distância por meio de equipamento conectado em rede, onde a permissão de geração é gerenciada pela concessionária em tempo real.

Certamente este trabalho pretende cobrir os principais métodos de segurança, proteção e

confiabilidade necessários, mas não se limita, como utiliza tecnologia aberta, pode ser corrigido e ajustado sempre que a demanda o orientar.

Com esta contribuição espera-se que cada vez mais este tema se estabeleça, permitindo a todos uma participação no que se refere à geração distribuída, já que em todo caso, chega agora à residência do consumidor final.

O método aqui proposto foi testado em pequena escala, e novas pesquisas tornam-se necessárias no sentido de esgotar todos os detalhes construtivos e técnicos, assim como a constante necessidade de atualização da tecnologia empregada, e de obter as certificações necessárias dos protótipos para pleitear a categoria de produto final, necessitando-se para isto de investimentos em certificação e produção em escala deste módulo de controle CC e módulo coordenador.

Sugestões de estudos se estendem a eventuais problemas que serão levantados na utilização em escala destes módulos de controle, tais como limites de distância na comunicação dos módulos *ZigBee*, e ampliação do número de canais de controle por placa, assim como limitações de potência.

Para aplicações de grande escala um único módulo coordenador pode ser construído com o objetivo de gerenciar diversos módulos de controle CC utilizando o sistema *Zigbee* rede MESH, e com Servidor de *internet* incorporado ao módulo coordenador, desta forma basta uma conexão de *internet*, procedendo da mesma forma que os atuais DVR para sistemas de segurança (INTELBRAS, 2012), que se limita a uma área de aproximadamente 1 km de raio por módulo coordenador, permitindo-se assim atender grandes plantas de GDFV.

Como trabalho futuro, prevê-se o desenvolvimento de um módulo único para aplicações de pequena escala *SMART GRID* residencial, com acesso em tempo real dos dados de geração por meio do consumidor e da concessionária, utilizando a tecnologia DNP v.3, e a visualização por IP padrão *Ethernet* via *web site* em ambiente seguro do *status* geral atual da geração, assim como o acumulado do período.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

+ ZERO. Blog de desenvolvimento Arduino Brasil. **Arduino Brasil**, 2012. Disponível em: <<http://www.arduino.com.br/blog/>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

ABREU, Y. V.; OLIVEIRA, M. A. G.; GUERRA, S. M.-G. (Org.). **Energia, Economia, Rotas Tecnológicas. Textos selecionados**. Málaga, Espanha: eumed.net, 2010.

ALBACORE. Connectware technology Store. **Manual INT700 XBee Placa USB e Serial USB**, 2010. Disponível em: <http://www.albacore.com.br/images/albacore/pdf/Manual_INT700_Placa_Serial_USB_v1_04.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2012.

_____. Tecnologias de comunicação ZigBee. **Suprimentos Xbee**, 2012. Disponível em: <<http://www.albacore.com.br>>. Acesso em: 02 fev. 2012.

ALQUIMIA MODERNA. Metalização por Câmara. **Prós e Contras da cromação por galvanoplastia**, 2012. Disponível em: <<http://www.cardinale.com.br/cromo.html>>. Acesso em: 06 fev. 2012.

AMBIENTE ENERGIA. Grau solar: alternativa tecnológica. **O Instituto de Pesquisa de São Paulo (IPT) trabalha com refino de silício desde o final da década de 80**, 2012. Disponível em: <<http://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2012/05/19226/19226>>. Acesso em: 19 jun. 2012.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL abre audiência para definir novo padrão de medidor de energia**, 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=3571&id_area=90>. Acesso em: 10 jul. 2012.

_____. Agência Nacional de Energia Elétrica, Resolução Normativa nº 395/2009. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Cartilha de Acesso ao Sistema de Distribuição**, Brasília, p. 75, 2011. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/cartilha_revisao_1.pdf>. Acesso em: 05 dez. 2011.

_____. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Normativa Nº 482, DE 17 de abril de 2012. **Condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica**, Brasília, p. 4, 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2012.

ARAUJO, C. H. Banco Central do Brasil. **Perspectiva para a Inflação - Junho de 2011**, 2011. Disponível em: <www.bcb.gov.br/pec/apron/apres/Carlos_Hamilton_Relatorio_Inflacao_29-06-2011.pdf>. Acesso em: 03 set. 2011.

ARDUINO. Bootloader Development. **Software burned onto the chips that come with your Arduino boards**, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/Bootloader>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

_____. For information on the development of Arduino. **Arduino is an open-source electronics prototyping platform based on flexible arquitetura**, 2012. Disponível em: <<http://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 06 Maio 2012.

_____. Team Design. **Arduino UNO - Overview**, 2012. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

AZEVEDO, D. B. D.; GIANLUPPI, L. D. F.; MALAFAIA, G. C. Os custos ambientais como fator de diferenciação para as empresas. **Perspectiva economica online**, Porto Alegre, 06 fev. 2007. 13.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 6. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC, 1999.

BRANKERA, K.; PATHAKA, M. J. M.; PEARCEA, J. M. Renewable and Sustainable Energy Reviews - ELSEVIER. **A Review of Solar Photovoltaic levelized Cost of Electricity**, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111003492>>. Acesso em: 25 set. 2011.

BRASIL. Compromissos do Brasil com a COP15. **Acordo de Genebra**, 2009. Disponível em: <<http://www.cop15brasil.gov.br>>. Acesso em: 23 Abril 2011.

CGEE-NOTÍCIAS. Semicondutores Orgânicos. **Desenvolvimento de dispositivos é chance do Brasil no mercado da nova tecnologia, aponta prospecção do CGEE**, 2012. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/noticias/viewBoletim.php?in_news=751&boletim=>>. Acesso em: 24 fev. 2012.

DIGI. Multipoint Xbee. **Embedded RF Modules for OEMs**, 2011. Disponível em: <http://www.digi.com/pdf/ds_xbeemultipointmodules.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2011.

_____. Software Downloads. **X-CTU Software**, 2012. Disponível em: <<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3352>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

_____. Your M2M solutions expert. **RF modules utilizing the ZigBee PRO Feature Set**, 2012. Disponível em: <<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module#overview>>. Acesso em: 11 jul. 2012.

EBAY. Ebay Store. **xbee shield**, 2012. Disponível em: <http://www.ebay.com/sch/i.html?_sacat=0&_nkw=xbee+shield>. Acesso em: 03 maio 2012.

EE TIMES. Design. **The Importance of sleep mode power consumption****The Importance of sleep mode power consumption in ZigBee/802.15.4 applications**, 2006. Disponível em: <www.eetimes.com/design/industrial-control/4013677/The-Importance-of-sleep-mode-power-consumption-in-ZigBee-802-15-4-applications>. Acesso em: 12 mar. 2012.

EIA-US. Energy Information Administration, 2010. Disponível em: <<http://tonto.eia.doe.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm>>. Acesso em: 21 mar. 2010.

ELEKTOR. Revista de Eletrônica. **A estrada rumo à eficiência: painéis solares orgânicos tandem de baixo custo da IMEC**, 2012. Disponível em: <<http://www.elektorbrasil.com.br/noticias/a-estrada-rumo-a-eficiencia-paineis-solares.2079886.lynkx>>. Acesso em: 02 fev. 2012.

ELEKTROS. Gamyba.it Products Information. **High frequency grid inverter specification, Grid Inverter (High efficiency)**, 2012. Disponível em: <<http://www.elektrosgamyba.lt/en/grid-inverter-high-eficiency1>>. Acesso em: 17 jun. 2012.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **CADERNOS DE ENERGIA EPE, PERSPECTIVAS PARA O ETANOL NO BRASIL**, Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/Estudos_28/Cadernos%20de%20Energia%20-%20Perspectiva%20para%20o%20etanol%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 14 maio 2011.

_____. Consumo de energia elétrica no país crescerá 4,8% ao ano até 2020. **INFORME À IMPRENSA, Demanda de energia elétrica – 10 anos**, 2011. Disponível em: <www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20110222_2.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2011.

EUDORA SOLAR. Fornecedores de serviço e equipamentos acesso a tecnologia pelo grande público. **Sua casa sustentável: energia elétrica limpa e sustentável**, 2012. Disponível em: <http://www.eudorasolar.com.br/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=18>. Acesso em: 10 jun. 2012.

FAIRCHILD. Semiconductor MOSFET. **10A, 400V, 0.550 Ohm, N-Channel Power**, 2002. Disponível em: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/IRF740.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2012.

FALUDI, R. **Building Wireless Sensor Networks: A practical guide to the ZigBee Mesh networking protocol**. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, INC., 2010. 320 p. ISBN 0596807732.

FITZGERALD E. A; KINGSLEY JUNIOR C. K.; UMANS S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência**. 6. ed. São Paulo: Bookman, 2006. 607 p.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos Elétricos**. 4. ed. São Paulo: Erica, 2007.

_____, C. M. **Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Erica, 2008.

FRIAS, R. N. TELECO Seção: Tutoriais Telefonía Celular. **Tutoriais Telefonía Celular - ZigBee Aplicações**, 2012. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialzigbee/pagina_2.asp>. Acesso em: 24 jun. 2012.

GOLDEMBERG, J. **DOSSIÊ RECURSOS NATURAIS: Energia e desenvolvimento**. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 15. 1998.

GOTA D'ÁGUA. Movimento de crítica às novas usinas hidrelétricas. **MOVIMENTO GOTA D'ÁGUA**, 2012. Disponível em: <<http://www.movimentogotadagua.com.br/>>. Acesso em: 20 maio 2012.

GOUVEIA, R. Câmara dos Deputados PL 630/2003 Inteiro teor. **Altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, constitui fundo especial para financiar pesquisas e fomentar a produção de energia elétrica e térmica a partir da energia solar e da energia eólica, e dá outras providências.**, 2003. Disponível em: <www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=109513>. Acesso em: 15 ago. 2011.

IBAMA. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **LEI Nº 6.938, DE 31 DE AGOSTO DE 1981**, 1981. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938compilada.htm>. Acesso em: 10 mar. 2012.

IBGE. Pesquisa de Orçamentos Familiares. **A Pesquisa de Orçamentos Familiares 2002-2003 teve por objetivo fornecer informações sobre a composição dos orçamentos domésticos, a partir da investigação dos hábitos de consumo**, 2003. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pof/2002_2003perfil/default.shtm>. Acesso em: 21 mar. 2012.

IEA. International Energy Agency. **Key Word Energy Statistics**, Paris, p. 80, 2011. Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2011.

INTELBRAS. Segurança Eletrônica. **VD 16M 480 - Gravador digital de vídeo**, 2012. Disponível em: <<http://www.intelbras.com.br/Produtos/Seguranca-Eletronica/CFTV/Gerenciamento-de-imagens/Gravadores/servidores-digitais-de-video/VD-16M-480-Gravador-digital-de-video>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

INTELIGENTE, R. Rede Inteligente. **Aneel aposta nas redes inteligentes para melhoria da qualidade do serviço de distribuição**, 2012. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2012/08/10/aneel-aposta-nas-redes-inteligentes-para-melhoria-da-qualidade-do-servico-de-distribuicao/>>. Acesso em: 10 ago. 2012.

ISTO É DINHEIRO. CBS Companhia Brasileira de Semicondutores. **Ilusão de ótica, O projeto da primeira fábrica brasileira de semicondutores volta aos holofotes. Mas, para se tornar realidade, será necessário superar desafios gigantescos.**, 2012. Disponível em: <<http://www.cbs-semi.com/>; http://www.istoedinheiro.com.br/noticias/79380_ILUSAO+DE+OTICA>. Acesso em: 06 mar. 2012.

ITU. International Telecommunication Union, Impact of industrial, scientific and medial (ISM) equipment on radiocommunication services. **Report ITU R SM. 2180**, set. 2010. Disponível em: <www.itu.int/pub/R-REP-SM.2180>. Acesso em: 04 fev. 2012.

_____. International Telecommunication Union, Recommendations ITU-T G.9955 and G.9956 define three international next generation narrowband powerline communications (NB-PLC). **ITU approves new worldwide smart grid standards**, 2011. Disponível em: <http://www.itu.int/net/pressoffice/press_releases/2011/CM16.aspx>. Acesso em: 24 abr. 2012.

KILL A WATT. Innovative Electronics Solutions. **P3 International**, 2012. Disponível em: <<http://www.p3international.com/products/special/P4400/P4400-CE.html>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

LABCENTER. Electronics the home of proteus. **Professional PCB design software with integrated shape based autorouter Isis - proteus**, 2012. Disponível em: <<http://www.labcenter.com/index.cfm>>. Acesso em: 03 jul. 2012.

LANDISGYR. E750. **Medidor eletrônico polifásico, multi-função, bidirecional**, 2012. Disponível em: <http://www.landisgyr.com/bl/pt/pub/produtos_e_solucoes/e750.cfm>. Acesso em: 23 jun. 2012.

LIU, E.; BEBIC, J. National Renewable Energy Laboratory, GE Global Research Niskayuna, New York. **Distribution System Voltage Performance Analysis for High Penetration Photovoltaics**, 2008. Disponível em: <<http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/42298.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2012.

MATTOSO, V. Energia, Ambiente & Desenvolvimento, UFSC. **Desenvolvimento e Energia**, Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://www.guiafloripa.com.br/energia/desenvolvimento/desenv_energia.php>. Acesso em: 05 jan. 2012.

MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. **Photovoltaic Systems Engineering**. 2. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. 435 p.

MESSIAS, A. R. Rogercom XBee® Wi-Fi. **Adicionando um dispositivo Serial RS232 com XBee Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n), numa Rede de Infraestrutura (BSS - Basic Service Set).**, 2011. Disponível em: <<http://www.rogercom.com/XBeeWi-Fi.htm>>. Acesso em: 03 maio 2011.

MINIPA. Fornece instrumentos de medição. **Analizador de Energia Modelo ET-5051C**, 2012. Disponível em: <http://www.minipa.com.br/Caracteristicas.aspx?ID_Sub_Categoria=6&ID=498>. Acesso em: 07 jul. 2012.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Balço Energético Nacional - BEN, subsidia o planejamento do setor energético**, Brasília, p. 52, 2011. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 25 nov. 2011.

_____. EPE. Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia, 2020**, Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf>. Acesso em: 23 maio 2012.

MPX, GRUPO EBX. MPX - Parte do Grupo EBX. **MPX conecta usina solar de Tauá (CE) à rede elétrica nacional**, 2011. Disponível em: <www.mpx.com.br/pt/sala-de-imprensa/noticias/Paginas/MPX-conecta-usina-solar-de-Tau%C3%A1-%28CE%29-%C3%A0-rede-el%C3%A9trica-nacional.aspx>. Acesso em: 08 nov. 2011.

_____, GRUPO EBX. Solar Tauá - Primeira usina solar brasileira. **O empreendimento localizado no Ceará tem potência suficiente para suprir de energia 1,5 mil residências**, 2012. Disponível em: <<http://www.mpx.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/usinas-em-operacao/Paginas/solar-taua.aspx>>. Acesso em: 03 abr 2012.

MULTILÓGICA. Open Source Hardware Store. **Sensor de corrente ACS714 -30 a +30A**, 2012. Disponível em: <<http://multilogica-shop.com/sensor-de-corrente-acs714-30-30a>>. Acesso em: 16 jul. 2012.

NI. National Instruments. **Maximum Power Point Tracking, Theory Behind a Few Algorithms**, 2009. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/8106/en>>. Acesso em: 01 abr. 2012.

PEREIRA, L. A. A. **Causas, efeitos e tratamento das agressões por hidrocarbonetos em animais marinhos e de estuários**. TCC de Licenciatura e Bacharelado em Ciências Biológicas - Universidade Iguçu. Nova Iguçu - RJ, p. 112. 2004.

PNUMA. Green Economy Initiative. **Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente**, 2011. Disponível em: <www.pnuma.org.br/index.php>. Acesso em: 12 nov 2011.

POMILIO, J. A. Eletrônica de Potência Módulo 6 FEEC - UNICAMP. **CONVERSORES CC-CA: INVERSORES OPERANDO EM FREQUÊNCIA CONSTANTE**, 2011. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/ee833/Modulo6.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2011.

PSE&G'S. Solar 4 All TM Program. **The PSE&G Solar 4 All™ program will add 80 megawatts (MW) of solar electric generation capacity to the PSE&G electrical system by the end of 2012**, 2012. Disponível em: <<http://www.pseg.com/family/pseandg/solar4all/index.jsp>>. Acesso em: 03 abr. 2012.

RIO+20. Conferência das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável. **Tema, A economia verde no contexto do desenvolvimento sustentável e da erradicação da pobreza e a estrutura institucional para o desenvolvimento sustentável**, 2012. Disponível em: <http://www.rio20.gov.br/sobre_a_rio_mais_20/temas>. Acesso em: 10 jun. 2012.

SANTOS, S. T. **REDES DE SENSORES SEM FIO EM MONITORAMENTO E CONTROLE**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio. Rio de Janeiro: COPPE. 2007. p. 7-8.

SÃO PAULO, A. L. LEI Nº 13.798, DE 9 DE NOVEMBRO DE 2009. **Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas - PEMC**, 12 mar. 2012. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei%20n.13.798,%20de%2009.11.2009.htm>>. Acesso em: 27 fev. 2012.

SEVERINO, M. M. **Avaliação técnico-econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia**. Publicação PPGENE.TD-027/08. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília. Brasília, p. 358. 2008.

SHANDONG HILIGHT-SOLAR CO., LTD. Solar Panel,Solar Module,Solar Power System,Solar Water Pump,Solar Street Light. **Alibaba.com global trade starts here**, 2012. Disponível em: <http://portuguese.alibaba.com/gs-suppliers_hilightsolar; <http://portuguese.alibaba.com/product-gs/230w-poly-solar-panel-541118590.html>>. Acesso em: 09 ago. 2012.

SHAYANI, R. A. **Medição de um Rendimento Global Fotovoltaico Isolado Utilizando Módulos de 32 Células**. Publicação PPGENE.DM-256/06, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília. Brasília, p. 225. 2006.

_____, R. A. **Método para Determinação do Limite de Penetração da Geração Distribuída Fotovoltaica em Redes Radiais de Distribuição**. Publicação PPGENE.TD-051/10, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília. Brasília, p. 161. 2010.

SHENZHEN TECHNOLOGY. Guangdong China (Mainland) global site market. **Grid Tie Inverter for solar panel 200W**, 2012. Disponível em: <<http://www.aliexpress.com/product-fm/557675641-200W-Grid-Tie-Inverter-for-solar-panel-wholesalers.html>>. Acesso em: 07 jul. 2012.

SHIELDLIST. Shield Arduino List. **Pin usage details for 288 shields from 116 makers and counting**, 2012. Disponível em: <<http://shieldlist.org/>>. Acesso em: 03 jul. 2012.

SNOWPEAK ENERGY. SunCatcher Technology tm, Inc. **Using our integration skill sets, we have developed the next generation of solar energy collectors**, 2012. Disponível em: <<http://snowpeakenergy.com/home>>. Acesso em: 13 jun. 2012.

SOLAR PLUS. Produção de Painéis Solares SA. **Módulos Solares fotovoltaicos de silício amorfo com tecnologia thin film**, 2012. Disponível em: <<http://www.solarplus.pt/>>. Acesso em: 14 mar. 2012.

TERRA NOTÍCIAS. Tecnologia Eletrônicos. **Painéis solares geram energia com cascas de frutas**, 2009. Disponível em: <<http://tecnologia.terra.com.br/noticias/0,OI3630840-EI12882,00-Paineis+solares+geram+energia+com+cascas+de+frutas.html>>. Acesso em: 12 abr. 2012.

THOMAS ORTMAYER, R. D. D. C. T. K. P. B. Issued by Sandia National Laboratories, operated for the United States Department of Energy by Sandia Corporation. **Renewable Systems Interconnection Study: Utility Models, Analysis, and Simulation Tools**, 2008. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/utility_models_analysis_simulation.pdf>. Acesso em: 21 dez. 2011. Colaboradores: Ortmeyer, Thomas; Dugan, Roger; Crudele, David; Key, Thomas; Barker, Phil.

TIBA, C. **Atlas solarimétrico do Brasil: Banco de dados solarimétricos**. 2. ed. Recife: UFPE, 2000.

TOLMASQUIM, M. T. (). **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência: CENERGIA, 2003.

UNICA. **União da Indústria de Cana-de-açúcar Etanol e Bioeletricidade: Procedimento para determinação da “Potência Instalada” e “Potência Líquida”**. Colaboradores: Eduardo L. Leão de Sousa e Isaias de Carvalho Macedo. CONSULTA PÚBLICA Nº 006/2011 ANEEL. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação Ltda. 2011. p. 315.

WIKIPÉDIA. Enciclopédia livre. **Hidrocarbonetos**, 2012. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Hidrocarboneto>>. Acesso em: 02 jul. 2012.

_____. Enciclopédia livre. **O Pró-Álcool ou Programa Nacional do Álcool**, 2012. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Pr%C3%B3-C3%A1lcool>>. Acesso em: 05 mar. 2012.

_____. Enciclopédia livre. **Radiofrequência**, 2012. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Radiofrequ%C3%Aancia>>. Acesso em: 11 maio 2012.

_____. Enciclopédia livre. **Gerber format**, 2012. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Gerber_format>. Acesso em: 28 jul. 2012.

WINDSTAR. Product Details. **Standard LCD module**, 2012. Disponível em: <http://www.winstar.com.tw/products_detail_ov.php?col_lang=en&ProID=24>. Acesso em: 10 jul. 2012.

YUEQING SANDI ELECTRIC CO LTD. PV Grid-Connected Inverter, GTI Grid Series SGTI-200W. **Specialized in the new energy source and electrical source scientific research, development, manufacture and service**, Yueqing, p. 18, 2011. Disponível em: <http://www.cnsandi.cn/sdp/911164/4/pd-4607850/8383477-2448585/200W_Grid_Tie_Power_Inverter.html>. Acesso em: 05 maio 2012.

ZWERBEL, K.; MASON, J.; FTHENAKIS, V. Scientific American Brasil: Perspectivas Para a Energia Solar. **No ano de 2050, a energia solar poderá decretar o fim da dependência do petróleo e reduzir as emissões de gases de efeito estufa**, 2004. Disponível em: <http://www.ciencia.ao.usp.br/tudo/exibir.php?midia=sca&cod=_perspectivasparaaenergiasolarlarkenzweibeljamesmasonevasilisfthenakisscientificamericanbrasil69fev2008&action=print>. Acesso em: 23 ago. 2011.

APÊNDICE

A – ALGORITMO COMENTADO

O presente algoritmo foi desenvolvido para o Arduino UNO e executado no módulo coordenador.

```
#include <LiquidCrystal.h>           // Inclui biblioteca de referências
                                     do Display LCD

LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12); // Define os pinos de conexão
do                                     LCD

int P1 = 2;                          // Declaração de variável
int P2 = 3;                          // Declaração de variável
int P3 = 5;                          // Declaração de variável
int P4 = 4;                          // Declaração de variável
float Vac = 0;                       // Declaração de variável
float SVac = 0;                      // Declaração de variável
float pSVac = 0;                    // Declaração de variável
float Icc = 0;                      // Declaração de variável
float SIcc = 0;                    // Declaração de variável
float pSIcc = 0;                   // Declaração de variável
float SP1 = 0;                      // Declaração de variável
float SP2 = 0;                      // Declaração de variável
float SP3 = 0;                      // Declaração de variável
float SP4 = 0;                      // Declaração de variável
float V1,V2,V3,V4,V5,V6 = 0;       // Declaração de variável
float C1,C2,C3,C4,C5,C6 = 0;       // Declaração de variável

//declaração de chaves para despacho

void setup() {                      // Inicia seção de configuração
  Serial.begin(9600);               // Inicia porta serial com 9600 bauds
  lcd.begin(16, 2);                 // Inicia LCD
  pinMode(P1, OUTPUT);              // Define P1 como entrada
  pinMode(P2, OUTPUT);              // Define P2 como entrada
```

```

pinMode(P3, OUTPUT);           // Define P3 como entrada
pinMode(P4, OUTPUT);           // Define P4 como entrada

//Chaves

pinMode(16, INPUT);           // Define P1 como entrada
pinMode(17, INPUT);           // Define P2 como entrada
pinMode(18, INPUT);           // Define P3 como entrada
pinMode(19, INPUT);           // Define P4 como entrada
}

void loop () {                 // Inicia seção

// Leitura chaves

SP1 = digitalRead(16);         // Lê porta analógica e armazena
SP2 = digitalRead(17);         // Lê porta analógica e armazena
SP3 = digitalRead(18);         // Lê porta analógica e armazena
SP4 = digitalRead(19);         // Lê porta analógica e armazena

//Sensores

lcd.setCursor(7,0);           // Posiciona cursor
lcd.print("Vac:");            // Escreve LCD
Serial.print(" Vac: ");        // Escreve porta serial

//Tratamento do sinal de tensão média

V1=analogRead(A0);            // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                      // Pausa por 1ms
V2=analogRead(A0);            // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                      // Pausa por 1ms
V3=analogRead(A0);            // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                      // Pausa por 1ms
V4=analogRead(A0);            // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                      // Pausa por 1ms
V5=analogRead(A0);            // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                      // Pausa por 1ms
V6=analogRead(A0);            // Lê porta analógica e armazena

```

```

Vac= (V1+V2+V3+V4+V5+V6)/6;           // Lê porta analógica realiza média e
                                        // armazena em Vac

//Tratamento do sinal de corrente média

C1=analogRead(A1);                     // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                               // Pausa por 1ms
C2=analogRead(A1);                     // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                               // Pausa por 1ms
C3=analogRead(A1);                     // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                               // Pausa por 1ms
C4=analogRead(A1);                     // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                               // Pausa por 1ms
C5=analogRead(A1);                     // Lê porta analógica e armazena
delay(1);                               // Pausa por 1ms
C6=analogRead(A1);                     // Lê porta analógica e armazena

Icc= (C1+C2+C3+C4+C5+C6)/6;           // Lê porta analógica realiza média e
                                        // armazena em Icc

SVac = Vac * (2.0 / 950.0);           // Conversão do sinal lido em Valores
                                        // reais

pSVac = 127*SVac;                      //Transforma de pu para real

lcd.print(pSVac);                      // Escreve no LCD
Serial.println(pSVac);                 // Escreve porta

lcd.setCursor(7,1);                   // Posiciona o cursor em 7,0
lcd.print("Icc:");                    // Escreve Icc:
Serial.print("Icc:");                 // Escreve na porta

SIcc = (Icc)*(1.0 / 950.0);           // Conversão do sinal lido em Valores
                                        // reais

pSIcc = 16*SIcc;                      // Transforma de pu para real

lcd.print(pSIcc);                     // Escreve Icc
Serial.print(pSIcc);                  // Na porta

//Critérios de desconexão

if (SVac>=1.035 or SIcc>=0.90 or SP4==HIGH){ // lógica de controle

    digitalWrite(P4, LOW);            // Desconexão de geração por Limite
                                        // de tensão superior ou Limite de

```

```

corrente na barra CC ou
despacho

Serial.print("P4 OFF ");           // Escreve na porta serial
}

else {
    digitalWrite(P4, HIGH);         // Liga painel
    Serial.print("P4 ON ");         // Escreve na porta serial
    lcd.setCursor(3,1);             // Posiciona o cursor
    lcd.print("P4");                // Escreve no LCD
}

if (SVac>=1.039 or SICC>=0.95 or SP3==HIGH){ // lógica de controle
    digitalWrite(P3, LOW);          // Desconexão de geração por Limite
                                     de tensão superior ou Limite de
                                     corrente na barra CC ou
                                     despacho

    Serial.print("P3 OFF ");
}

else {
    digitalWrite(P3, HIGH);
    Serial.print("P3 ON ");
    lcd.setCursor(3,0);
    lcd.print("P3");
}

if (SVac>=1.043 or SICC>=1 or SP2==HIGH){ // lógica de controle
    digitalWrite(P2, LOW);          // Desconexão de geração por Limite
                                     de tensão superior ou Limite de
                                     corrente na barra CC ou
                                     despacho

    Serial.print("P2 OFF ");
}

else {

```

```

    digitalWrite(P2, HIGH);
Serial.print("P2 ON ");
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("P2");
}

if (SVac>=1.047 or SIcc>=1.05 or SP1==HIGH){ // lógica de controle
    digitalWrite(P1, LOW);           // Desconexão de geração por Limite
                                     // de tensão superior ou Limite de
                                     // corrente na barra CC ou
                                     // despacho

Serial.print("P1 OFF ");
}
else {
    digitalWrite(P1, HIGH);
Serial.print("P1 ON ");
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("P1");
}
delay(190);           // 190ms
lcd.clear();         // Limpa LCD
}                     // Fim.

```

B – COMPONENTES UTILIZADOS

Componentes do protótipo da placa de controle CC:

20 Resistores			
Quantidade	Referências	Valores	Código
1	R1	150R	M10K
1	R2	470R	M300R
1	R3	100R	M100K
2	R4, R42	10K	M10K
4	R5-R8	1K	M1k
4	R12, R16-R18	560R	M560R
4	R19-R22	560R	M220R
1	R23	3.3k	M1k
1	R24	4.7	M1k
1	R32	2.2	M10K

5 Capacitores			
Quantidade	Referências	Valores	Código
1	C1	1u	MaplinVH16S
1	C2	1000u	MaplinUQ31J
1	C3	100u	MaplinVH37S
1	C4	330u	MaplinVH45Y
1	C5	100u	MaplinWW41U

7 Circuitos Integrados			
Quantidade	Referências	Valores	Código
1	U1	7812	–
1	U2	LM317EMP	–
1	U3	7805	–
4	U6-U9	Optoacoplador - NPN	–

04 Transistores			
Quantidade	Referências	Valores	Código
4	Q1-Q4	BC548	–

9 Diodos			
Quantidade	Referências	Valores	Código
4	D1-D4	1N4007	–
1	D5	LED-Azul	–
4	D6-D9	LED-Vermelho	–

17 Conectores e Terminais			
Quantidade	Referências	Valores	Código
4	BAT2-BAT5	24V	
2	J1, J2	25631001RP2	25631001RP2
1	J3	TBLOCK-I2	
1	J4	25630301RP2	25630301RP2
4	RL2-RL5	NTE-R46-12	
1	RV1	220R	
2	RV2, RV3	1k	
1	TR1	TRAN-2P3S	
1	V1	VSINE	

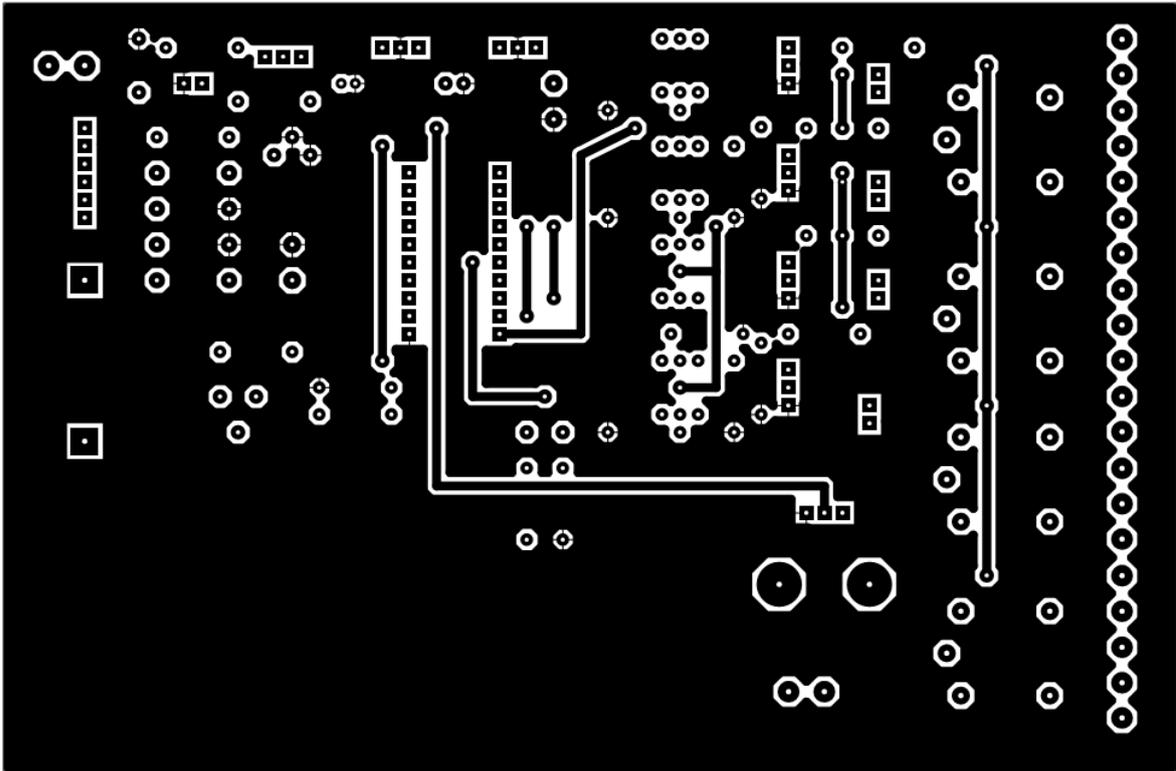
Componentes do protótipo da modulo coordenador:

Componentes			
Quantidade	Referencias	Valores	Código
1	Arduino Uno	USB	-
1	Display LCD	16x2	-
1	Xbee-PRO	S1	-
1	Potenciômetro	10k	-
4	Chaves	On/Off	-
1	Base Xbee	20 pinos	-
1	ScrewShield	Arduino	-
2	Capacitores	1000uF 16V	-
2	Resistores	10k	-

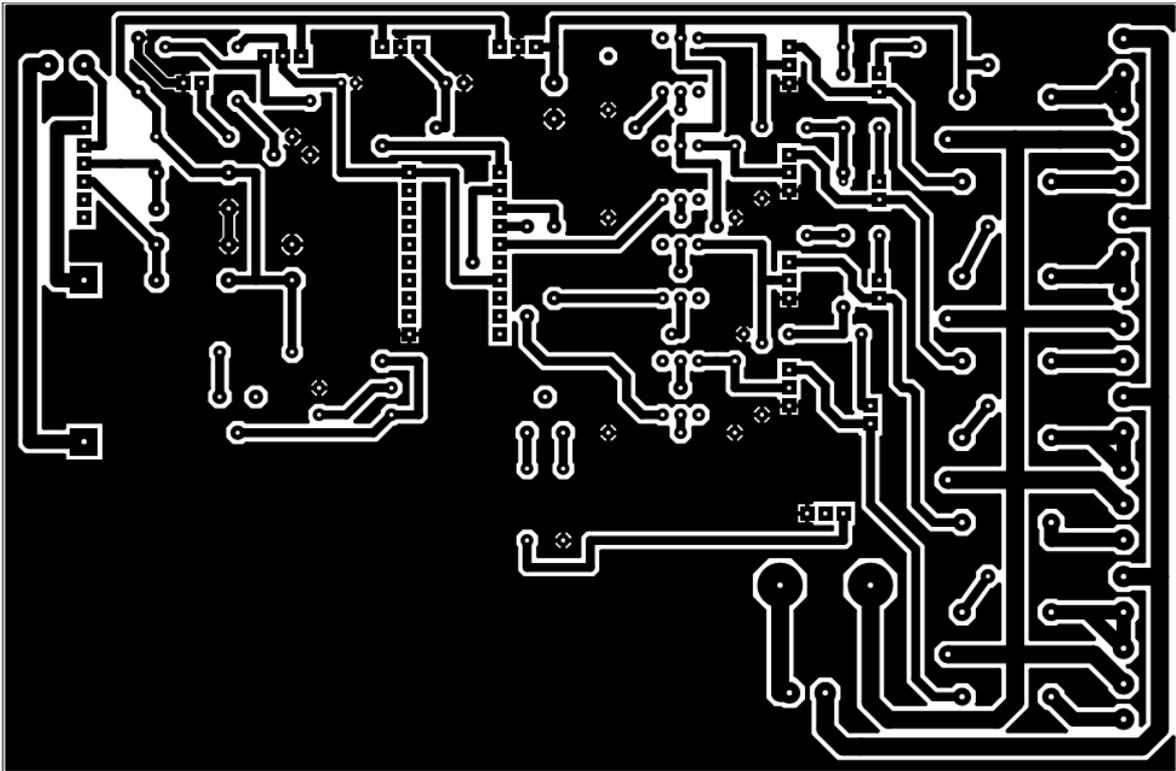
C – DESENHO DA PLACA DE CONTROLE CC

Desenho de circuito em escala real para impressão do módulo de controle CC.

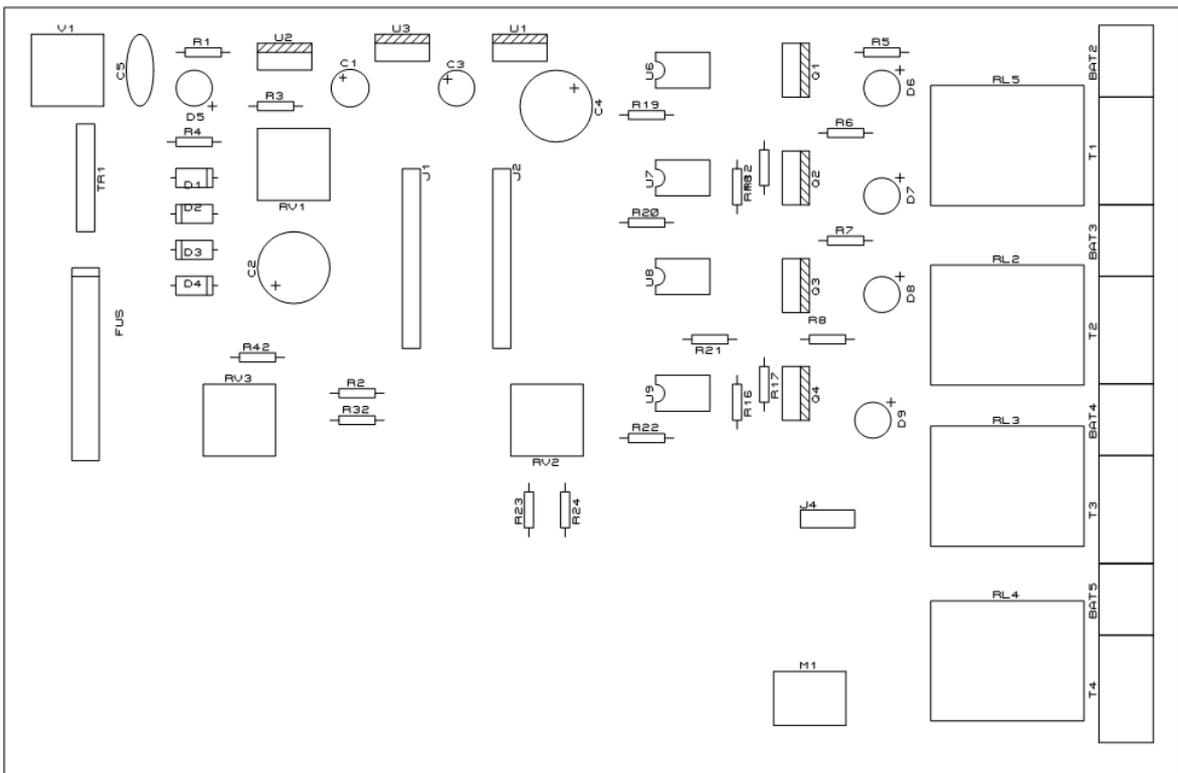
Layer Top:



Layer Bottom:



Layer Silkscreen:



ANEXOS

A – PARÂMETROS CONSTRUTIVOS DO *GRID TIE* SERIES

Modelos series GRIDTIE:	200W	300W	400W	500W	600W	800W	1000W
Painéis solares recomendados	320W _p	420W _p	520W _p	620W _p	720W _p	1050W _p	1250W _p
DC potência máxima de entrada	300W	400W	500W	600W	700W	900W	1200W
DC voltagem máxima	V _{p v} DC 30.2VDC						
DC faixa de voltagem	V _{p v} 10.5V ~ 28VDC						
Corrente máxima de entrada	15A	20A	25A	30A	40A	45A	65 ^a
AC potência de saída	200W	300W	400W	500W	600W	800W	1000W
AC potência máxima de saída	200W	300W	400W	500W	600W	1000W	
Proteção tensão reversa	Fusível						
AC faixa de voltagem padronizada	90V-140V/180V~260AV						
AC faixa de frequência	55Hz~63Hz/45Hz~53Hz						
Distorção harmônica total de corrente de saída	THDIAC<5%						
Distorção harmônica total de tensão	<1%						
Proteção contra ilhamento	VAC; f AC						
Proteção contra curto circuito	Limitador de Corrente						
Apresentação	LED						
Potência consumida hibernando (<i>standby</i>)	<1W						
Consumo durante a noite	<1W						
Faixa de temperatura de trabalho	-25C~60C						
Umidade	0~99% (ambientes abrigados)						
Resistência a água	Modelo para ambientes abrigados						

Compatibilidade Eletromagnética	EN50081.parte1 EN50082.parte1
Regras de distúrbios de potência	EN61000-3-2 EN60950-1
Teste de rede	DIN VDE 126
Resfriamento	Ventilador
Apresentação	1 LED Vermelho e 1 LED Verde
Instalação	Pendurado na parede
Peso Líquido	1.3kg (200-600W)
Peso Bruto	2.0kg (200-600W)
Tamanho (L x W x H)	21x16.5x5.3cm
<i>AC power cord length</i>	1.8m

B - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS MEDIDOR

P4400 Kill A Watt™ Operation Manual

Congratulations on your purchase of the Kill A Watt™ Power Meter. Cared for properly, this unit will provide you with years of service.

1. The LCD shows all meter readings: Volts, Current, Watts, Frequency, Power Factor, and VA. The unit will start to accumulate KWH and powered duration time (hour) after power is applied.
2. Press Volt Key for true RMS Voltage (Volts) display.
3. Press Amp Key for true RMS output current (Amps) display.
4. The Watt/VA Key is a toggle function key. Press the Watt/VA key once to display Watt meter, then press key to display VA meter. The LCD will display Watts as the active power, where VA is the apparent Power. ($VA = V_{rms} I_{rms}$)
5. The HZ/PF is a toggle function key. Press the HZ/PF key once to display the frequency (Hertz), then press key to display the Power Factor. HZ is the Frequency of output Voltage, where PF is the Power Factor ($PF = W / V_{rms} I_{rms}$).
6. The KWH/Hour is a toggle function key. Press the KWH/Hour key once to show the cumulative energy consumption since power was applied to the unit. Then press key to display the cumulative time since power was applied to the unit.
7. Consumption will be displayed in Kilowatt-Hours (from 0.01 KWH to 9999 KWH). Time will initially be displayed as Hours: Minutes (from 00:00) and switch to Hours (to 9999). Counters will recycle to zero when they reach their maximum. To reset, remove power from unit momentarily.

WARNING: Do not exceed maximum ratings as detailed on label.

C - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS ANALIZADOR DE ENERGIA

Dados técnicos do analisador de energia ET-5060C / ET-5060

Generalidades:

Mostrador:	Mostrador LCD ¼ VGA Graphic, 320 x 240 Pixel, com iluminação de fundo (liga/desliga) e contraste ajustável, representação de texto e gráficos em tons de cinza
Qualidade:	Desenvolvido, construído e fabricado segundo DIN ISO 9001
Memória:	Memória Flash de 2 MB, dos quais 1,5 MB destinam-se a dados de medição
Interface:	Conector fêmea RS 232 SUB-D; 115,2 kBaud, 8 bits de dados, sem paridade, 1 bit de parada, atualização do firmware através da interface RS 232 (cabo de extensão de 9-Pol 1:1)
Taxa de amostragem:	10,24 kHz
Frequência de rede:	50 Hz ou 60 Hz com sincronização automática
Gama de temperatura	
Gama de temperatura de trabalho:	-10° C...+50° C
Gama de temperatura de armazenamento:	-20° C...+60° C
Gama de temperatura de serviço:	0° C...+40° C
Gama de temperatura de referência:	+23° C ±2K
Coeficiente de temperatura:	±0,1 % do valor de medição por K
Erro intrínseco:	Refere-se à temperatura de referência, garantia de 2 anos
Erro operacional:	Refere-se à gama de temperatura de serviço, garantia de 2 anos
Classe climática:	C1 (IEC 654-1), -5° C..+45° C, 5%...95% RH, sem formação de umidade
Caixa:	Cycloloy – termoplástico resistente ao choques e aos riscos, versão V0 (não inflamável) com revestimento de proteção em borracha
EMC	
Emissão:	IEC/EN 61326-1:1997 Classe A
Imunidade:	IEC/EN 61326-1:1997 IEC/EN 61326-1, Emenda. 1: 1998
Alimentação:	Bateria NiMH, recarregável com adaptador (15V/0,8A)
Tempo de operação com bateria:	Típico: >24h sem iluminação >12h com iluminação
Medidas:	240 x 180 x 110 mm
Peso:	aprox. 1,7 kg (incluso bateria)

Segurança:

Tipo de proteção:	IEC 61010-1 600V CAT III, isolamento reforçado, grau de poluição 2
Proteção da caixa:	IP65 segundo EN60529 (refere-se somente à caixa base, com exclusão do compartimento das pilhas)

Especificações:

Os valores eficazes são medidos com uma resolução de 20ms.

Ligação estrela V-rms

Faixas de medição:	57 / 66 / 110 / 120 / 127 / 220 / 230 / 240 / 260 / 277 / 347 / 380 / 400 / 417 / 480 V AC
Erro intrínseco:	±(0.2% leitura + 5 dígitos)
Erro operacional:	±(0.5% leitura + 10 dígitos)
Resolução:	0,1 V

Ligação triângulo V-rms

Faixas de medição:	100 / 115 / 190 / 208 / 220 / 380 / 400 / 415 / 450 / 480 / 600 / 660 / 690 / 720 / 830 V AC
Erro intrínseco:	±(0.2% leitura + 5 dígitos)
Erro operacional:	±(0.5% leitura + 10 dígitos)
Resolução:	0,1 V

Medição A-rms

São suportados o LEM-flex e as garras de corrente com saída de tensão. Os sensores de corrente devem corresponder a 600V / Cat. III.

A resistência de entrada das entradas de corrente correspondem a $R_{in}=8,92k\Omega$.

Faixas LEM-flex I_N : 15 / 150 / 3000 A rms (senoidal)

Faixas garras de corrente: 5 / 50 / 500 mV AC

Resolução: 0,01 A

Faixas 150 / 3000 A ou 50 / 500 mV

Erro intrínseco: ±(0.5% leitura + 10 dígitos)

Erro operacional: ±(1.0% leitura + 10 dígitos)

Faixa 15 A

Erro intrínseco: ±(0.5% leitura + 20 dígitos)

Erro operacional: ±(1.0% leitura + 20 dígitos)

Os desvios dos sensores de corrente propriamente ditos não são considerados.

Se for usado o LEM~flex:

Erro intrínseco do LEM~flex: ±(2.0% leitura + 10 dígitos)

Medição da potência (P, Q, S, D)

Faixas de medição: vide medição U e I

Os desvios da potência são obtidos a partir da adição dos desvios da tensão e corrente.

Erro adicional devido ao fator de potência PF:

Desvio especificado x (1-IPFI)

Faixa de medição máxima com faixa de tensão 830V da ligação triângulo e faixa de corrente de 3000A é: 2.490MW

Erro intrínseco: $\pm(0.7\% \text{ leitura} + 15 \text{ dígitos})$

Resolução: 1 kW

Erro operacional: $\pm(1.5\% \text{ leitura} + 20 \text{ dígitos})$

Faixa típica com faixa de tensão 230V da ligação estrela e faixa de corrente de 150A é: 34,50kW

Erro intrínseco: $\pm(0.7\% \text{ leitura} + 15 \text{ dígitos})$

Resolução: 1 W a 10 W

Erro operacional: $\pm(1.5\% \text{ leitura} + 20 \text{ dígitos})$

Os desvios dos sensores de corrente propriamente ditos não são ainda considerados!

Fator de potência PF

Faixa de medição: 0,000 a 1,000

Resolução: 0,001

Precisão: $\pm 1\%$ fundo de escala

Medição da frequência

Faixa de medição: 46 Hz – 54 Hz e 56 Hz - 64 Hz

Erro intrínseco: $\pm(0.2\% \text{ leitura} + 5 \text{ dígitos})$

Erro operacional: $\pm(0.5\% \text{ leitura} + 10 \text{ dígitos})$

Resolução: 0,01 Hz

Harmônicas

Faixa de medição: 1...40.^a harmônicas (< 50% de U_m)

Precisão:

$U_m, I_m, THDU, THDI$: segundo IEC 1000-4-7, Classe B

#

THDU
U_N

para THD <3%: < 0,15% com

Tremulação

Faixa de medição: 1000-4-15	Nível de tremulação Pst segundo IEC
Erro intrínseco:	±(1.0% leitura + 10 dígitos)
Erro operacional:	±(2.0% leitura + 10 dígitos)
Resolução:	0,01

As especificações só são válidas 2 minutos após aplicação dos sinais!

Eventos

Detecção de quedas de tensão, sobretensões e interrupções da tensão com uma resolução de 10ms. Por motivos técnicos relacionados com a memória são registadas 999 eventos no máximo.

Erro de medição dos semi-ciclos de valores eficazes:

Erro intrínseco:	±(1.0% leitura + 10 dígitos)
Erro operacional:	±(2.0% leitura + 10 dígitos)
Resolução:	0,1 V

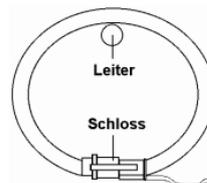
Assimetria

Erro do ângulo de indicação de fase:

Erro intrínseco:	±(0.5% leitura + 5 dígitos)
Erro operacional:	±(1.0% leitura + 10 dígitos)
Resolução:	0,1 °

Nota:

No caso de ser usado o LEM~flex deve-se ter atenção ao posicionamento correto. O condutor a medir deve estar em frente ao fecho (ver figura à direita).



Nota:

Nas representações gráficas, os valores numéricos são formatados com seleção de faixa automática. Por isso, os erros de dígitos devem ser corrigidos na relação resolução indicada/resolução especificada.