

Leonardo Candido Corrêa

Desenvolvimento e Avaliação de um Protótipo para
Monitoramento e Aquisição de Dados Climáticos para
Geradores Fotovoltaicos

Alegrete - RS

2011

Leonardo Candido Corrêa

**Desenvolvimento e Avaliação de um Protótipo para
Monitoramento e Aquisição de Dados Climáticos para
Geradores Fotovoltaicos**

Monografia apresentada para obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica
pela Universidade Federal do Pampa.

Orientador: Diego Berlezi Ramos

Alegrete - RS

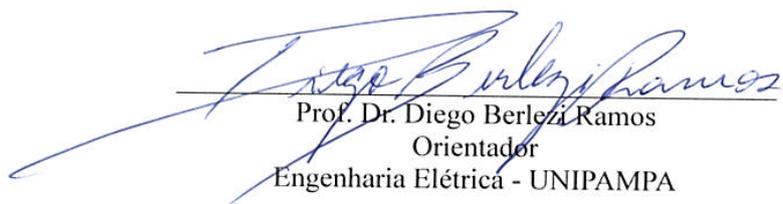
2011

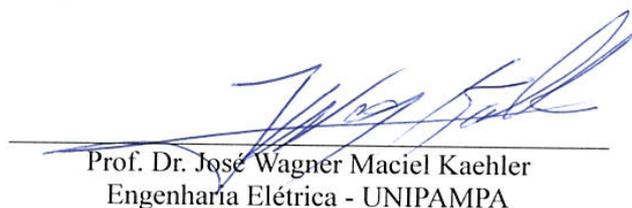
LEONARDO CANDIDO CORRÊA

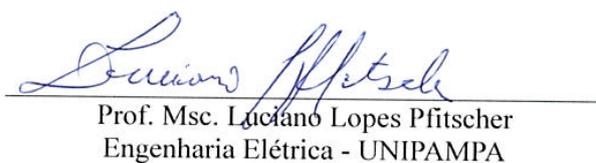
**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA
MONITORAMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS CLIMÁTICOS PARA
GERADORES FOTOVOLTAICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como parte das atividades para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Elétrica na
Universidade Federal do Pampa.

Trabalho apresentado e aprovado em: 22 de Dezembro de 2011.
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Diego Berlezi Ramos
Orientador
Engenharia Elétrica - UNIPAMPA


Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler
Engenharia Elétrica - UNIPAMPA


Prof. Msc. Luciano Lopes Pfitscher
Engenharia Elétrica - UNIPAMPA

Dedico esse trabalho à minha família, pelo apoio e
compreensão durante minha vida acadêmica.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço minha família, a qual compartilho momentos de alegria e sucesso, bem como derrotas e tristeza, mas que independente da situação estão prontos e, todas as vezes, aptos a passar uma palavra de conforto.

Em especial quero agradecer ao meu irmão Pablo, pelo fato de dividirmos apartamento enquanto nossa estadia coincidiu, durante esse tempo compartilhamos momentos muito divertidos, festas e churrascos na sacada, além de conversas de motivação e força para encarar mais um semestre de "suor" no curso de engenharia.

Outro agradecimento que com certeza não pode faltar é para os colegas de curso, que a nossa turma, sem dúvida, foi a turma mais unida da unipampa, os quais todos ajudavam uns aos outros, compartilhando listas de exercícios e relatórios, ou até mesmo para adiar uma provinha. Não pode ficar no esquecimento os colegas que trocaram de curso, Rafael (Bolha), obrigado pelas conversas amigas. Valeu, Antônio, pelas caronas de banheira, viagens demoradas para Santa não serão esquecidas também, e que até mesmo no exterior não deixou seu coleguismo de lado; saudação para o Roger, companheiro de virar noites estudando para as provas, por ter procrastinado os estudos.

Agradeço ao pessoal da Pró-Reitoria de Obras e Manutenção, em especial meu supervisor de estágio Max Henrique, que com muita compreensão proporcionaram-me uma flexibilidade nos horários de trabalho.

Um agradecimento em especial a todo o pessoal do CEEMA, ao professor Farret, Jordan e Luciano, que abriram as portas do grupo para que este trabalho fosse realizado.

Agir, eis a inteligência verdadeira. Serei o que quiser. Mas tenho que querer o que for. O êxito está em ter êxito, e não em ter condições de êxito. Condições de palácio tem qualquer terra larga, mas onde estará o palácio se não o fizerem ali?

Fernando Pessoa

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e avaliação de um protótipo para monitoramento e aquisição de dados para geradores fotovoltaicos. Devido a crescente demanda de energia elétrica, as fontes de energias renováveis estão tornando parte da matriz energética mundial.

Para a maximização da energia gerada através dos painéis fotovoltaicos, faz-se necessário o monitoramento dos dados de geração, bem como variáveis do local onde encontram-se instalados.

Através dos sensores e interfaces de condicionamento de sinais desenvolvidos, é avaliado, ao longo do dia, o comportamento de tensão, corrente, potência gerada e temperatura de um painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF instalado na cidade de Santa Maria, RS, além disso a temperatura e velocidade do vento do local. Uma interface gráfica é desenvolvida com o software **LabVIEW**[®] e os sinais adquiridos por uma placa de aquisição de dados USB NI-6251 da **National Instrument**[®].

Palavras-chave: PV, anemômetro, LabVIEW, monitoramento, aquisição de dados.

ABSTRACT

This work aims at the development and evaluation of a monitoring and data acquisition prototype to collect climate data for photovoltaic arrays (PV). It takes into account that, due to an increasing energy demand, renewable sources are becoming an essential component of the electrical world system. In order to improve the PV efficiency, continuous monitoring of the weather conditions where the system is installed is required. By using wind, temperature, current and voltage sensors, signal conditioning interfaces are developed. To accomplish the tests of the monitoring and data acquisition system, it is used a Siemens ProCharger 4JF PV, installed in Santa Maria, RS. The temperature and the wind speed data are collected by the system. The system Graphical User Interface (GUI) is based on LabView and the data acquisition is performed by a National Instruments USB NI-6251 board.

Key-words: PV, anemometer, LabVIEW, monitoring, data acquisition.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Sistema Interligado à Rede.	p. 17
2.2	Sistema Isolado com armazenamento de energia.	p. 17
2.3	Sistema Isolado sem armazenamento de energia.	p. 18
2.4	Elementos de um sistema híbrido de energia.	p. 19
2.5	Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.	p. 20
2.6	Curvas I-V e P-V, para radiação de $1000W/m^2$ e temperatura de -25, 25 e $90^{\circ}C$ (2.6a e 2.6b) e curvas I-V e P-V, para temperatura de $25^{\circ}C$ e radiação solar de 800, 1000 e $1500W/m^2$ (2.6c e 2.6d) de um painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF.	p. 23
2.7	Esquema de medição de corrente por resistor shunt.	p. 26
3.8	Circuito amplificador não inversor para o sensor LM35DZ.	p. 30
3.9	Resposta do circuito amplificador para tensão de entrada (<i>CH1</i>) e tensão de saída (<i>CH2</i>)	p. 31
3.10	Dados obtidos no ensaio de calibração de aquecimento e resfriamento do sensor 1.	p. 31
3.11	Dados obtidos no ensaio de calibração de aquecimento e resfriamento do sensor 2.	p. 32
3.12	Circuito sensor de tensão.	p. 32
3.13	Dados obtidos no ensaio de calibração do sensor de tensão.	p. 33
3.14	Circuito de amplificação do sinal de saída do sensor de corrente.	p. 34
3.15	Dados obtidos no ensaio de calibração do sensor de corrente.	p. 34
3.16	Protótipo do anemômetro.	p. 35
3.17	Circuito do sensor óptico para o cálculo da velocidade do vento.	p. 35

3.18	Tensão de entrada (<i>CH1</i>) e tensão de saída (<i>CH2</i>) do circuito comparador.	p. 36
3.19	Esquema de montagem para aferição do anemômetro.	p. 36
3.20	Velocidade do vento VERSUS frequência do sinal do sensor óptico. . .	p. 37
3.21	Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido, etapa de aquisição, condicionamento e equacionamento dos dados sensores.	p. 38
3.22	Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido, etapa de concatenação e formatação dos dados dos sensores.	p. 38
3.23	Arquivo de registro dos dados obtidos através do protótipo desenvolvido.	p. 39
3.24	Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido, etapa de contagem do tempo de armazenamento dos dados.	p. 39
3.25	Interface homem-máquina do protótipo desenvolvido.	p. 40
3.26	Plataforma de monitoramento e aquisição de dados desenvolvida. . . .	p. 41
3.27	Possibilidades de expansão da plataforma desenvolvida.	p. 41
4.28	Energia prevista para geração no mês de novembro.	p. 43
4.29	Comparação da energia prevista e gerada para o PV Siemens ProCharger 4JF no mês de novembro.	p. 44
4.30	Histograma de frequência para potência gerada por um painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF durante o dia 13 de novembro.	p. 45
4.31	Potência gerada pelo painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF e temperatura ambiente ao longo do dia 13 de novembro.	p. 46
4.32	Temperatura ambiente, temperatura do painel e potência gerada ao longo do dia 24 de novembro.	p. 47
4.33	Velocidade do vento e temperatura do painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF ao longo do dia 24 de novembro.	p. 47
4.34	Potência gerada pelo painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF e velocidade do vento ao longo do dia 24 de novembro.	p. 48

LISTA DE TABELAS

1	Características físicas e elétricas de um PV Siemens ProCharger 4JF para as condições padrões de teste ¹	p. 16
2	Aplicações para utilização de painéis fotovoltaicos.	p. 17
3	Características, vantagens e desvantagens de sistemas fotovoltaicos interligados a rede, sistemas isolados com armazenamento de energia e sistemas isolados sem armazenamento de energia.	p. 18
4	Potência máxima e eficiência obtidas para diferentes temperaturas e radiação solar incidentes.	p. 22
5	Características de alguns sensores de temperatura.	p. 26
6	Princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens de alguns anemômetros.	p. 27
7	Variáveis de monitoramento para sistemas fotovoltaicos, segundo IEC 61724.	p. 28
8	Características climáticas do mês de novembro para Santa Maria-RS e previsão de geração para um PV Siemens ProCharger 4JF.	p. 42
9	Comparação de potência, energia e insolação prevista e gerada para o PV Siemens ProCharger 4JF no mês de novembro.	p. 45
10	Distribuição de frequência da potência gerada de um PV Siemens ProCharger 4JF no dia 13 de mês de novembro.	p. 46
11	Tabela apresentando os dados do ensaio de calibração do sensor 1 para o aquecimento de 10 a 94°C.	p. 54
12	Tabela apresentando os dados do ensaio de calibração do sensor 1 para o resfriamento de 94 a 10°C.	p. 55
13	Dados do ensaio de calibração do sensor 2 para o aquecimento de 10 a 94°C.	p. 55

14	Tabela apresentando os dados do ensaio de calibração do sensor 2 para o resfriamento de 94 a 10°C.	p. 56
15	Valores de tensão de entrada e saída obtidos no ensaio do sensor de tensão.	p. 57
16	Valores de tensão de saída do circuito sensor de corrente obtidos no ensaio variando-se a corrente de entrada.	p. 58
17	Valores de frequência da onda quadrada de saída do sensor óptico e velocidade do vento no ensaio de calibração do anemômetro.	p. 59

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1	INTRODUÇÃO	p. 14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	p. 16
2.1	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	p. 16
2.1.1	MODELO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA	p. 19
2.2	MÉTODOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO	p. 25
2.2.1	TEMPERATURA	p. 25
2.2.2	CORRENTE CC	p. 26
2.2.3	VELOCIDADE DO VENTO	p. 27
2.2.4	MONITORAMENTO	p. 28
3	METODOLOGIA	p. 29
3.1	INSTRUMENTAÇÃO	p. 29
3.1.1	SENSOR DE TEMPERATURA	p. 29
3.1.2	SENSOR DE TENSÃO	p. 32
3.1.3	SENSOR DE CORRENTE	p. 33
3.1.4	ANEMÔMETRO	p. 34
3.2	AQUISIÇÃO DE DADOS	p. 37
3.2.1	AMBIENTE VIRTUAL DE INSTRUMENTAÇÃO LABVIEW	p. 37
3.3	CARACTERÍSTICAS DA PLATAFORMA DESENVOLVIDA	p. 40
4	RESULTADOS	p. 42

4.1	RESULTADOS TEÓRICOS	p. 42
4.2	RESULTADOS PRÁTICOS OBTIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA DE- SENVOLVIDO	p. 44
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	p. 49
	Referências	p. 51
	Anexos	53
	Anexo A: Dados Obtidos na Calibração dos Sensores de Temperatura	p. 54
	Anexo B: Dados Obtidos na Calibração do Sensor de Tensão	p. 57
	Anexo C: Dados Obtidos na Calibração do Sensor de Corrente	p. 58
	Anexo D: Dados Obtidos na Calibração do Anemômetro	p. 59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEEMA, Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente

UFES, Universidade Federal de Santa Maria

PV, Painel Fotovoltaico

P_{max} , Potência Máxima

V_{OC} , Tensão em Circuito Aberto

I_{SC} , Corrente de Curto Circuito

STC, Standard Test Conditions

CC, Corrente Contínua

CA, Corrente Alternada

MPPT, Busca pelo Ponto de Maior Potência

L , Radiação Solar Incidente no Painel

L_o , Radiação Solar Padrão

C_t , Coeficiente de Temperatura

η , Eficiência do Painel Fotovoltaico

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, devido ao seu posicionamento geográfico, apresenta grande potencial para geração fotovoltaica. A matriz energética brasileira, atualmente, baseia-se em grande parte em recursos hídricos, devido à disponibilidade destes recursos no território nacional. Em torno de 79,5GW são produzidos por grandes e pequenas usinas hidrelétricas, equivalendo a 70,7% da produção total de energia elétrica do país. no entanto, a potência instalada em usinas fotovoltaicas é de 5MW, embora apenas 1MW está em operação, o qual não atinge 1% da demanda total do país (ANEEL, 2011).

O Ministério de Minas e Energia lançou em novembro de 2007 a Matriz Energética Nacional 2030, a qual faz menção em relação às energias renováveis, porém não confirma a instalação de grandes parques de geração fotovoltaica (MME, Nov. 2007).

Em nível mundial na produção de energia fotovoltaica, a Alemanha é a maior produtora, com 5,3GW instalados, isto é 38% da capacidade total mundial, seguida da Espanha, 3,4GW, possuindo 24%, Japão, 2,1GW - 15%, EUA, 0,36GW - 8% e os demais países acumulando 1,97GW - 15% (ENERGY, 2010). A liderança destes países no setor de geração fotovoltaica se dá pelo fato destes possuírem elevados níveis de industrialização e indisponibilidade de outras de outras fontes de geração.

Durante a última década, as companhias de energia fotovoltaica da Europa têm crescido em média 40% ao ano, a Alemanha é o país com destaque no comércio de painéis fotovoltaicos, seguido da Espanha, Itália, França e Grécia (COMMISSION, 2009).

No entanto, apesar da energia solar ser abundante e gratuita, o sistema de geração de energia pelo efeito fotovoltaico, apresenta baixo rendimento, 3 a 31% (FARRET; SIMÕES, 2006), e o custo de fabricação das células fotovoltaicas ainda é elevado, dificultando a expansão desta para a matriz energética brasileira.

Assim, dados os aspectos levantados anteriormente, utilizam-se métodos computacionais para a busca do ponto de máxima potência e mecanismos como concentradores solares e rastreadores solares com o objetivo de reduzir o custo de instalação por kWh

gerado pelos painéis fotovoltaicos (FARRET; SIMÕES, 2006) (BRITO et al., 2011).

Para isso, este trabalho busca desenvolver uma ferramenta para o levantamento de dados do meio em que um gerador fotovoltaico encontra-se instalado. Com os dados obtidos e através do monitoramento em tempo real, algoritmos que buscam maximizar a potência drenada destes poderão ser implementados.

Esse trabalho pretende mostrar a construção e avaliação de um sistema de supervisão e monitoramento de um painel fotovoltaico através do ambiente virtual de instrumentação **LabVIEW**[®]. Para isso, profere-se o conceito de energia fotovoltaica, na qual aborda os fatores que influenciam a geração de eletricidade através dos painéis fotovoltaicos.

Nos tempos atuais o Brasil e o mundo encontram-se em pleno crescimento vegetativo e de desenvolvimento econômico, devido a isso, maior quantidade de energia elétrica é requerida. Políticas governamentais de apoio ao desenvolvimento sustentável, como o Protocolo de Kyoto que define metas de redução de gases que causam o efeito estufa, e seus indicadores, que inclui os recursos hídricos (FBDS, 2011), faz com que as energias renováveis sejam uma alternativa para suprir parte da energia que seria gerada por usinas termelétricas.

As fontes renováveis de energia são aquelas que sua fonte primária se regenera ao ponto de não terminar e causa o menor dano possível ao meio ambiente. Algumas fontes renováveis de energia são: solar (aquecimento e fotovoltaica), eólica, biomassa, célula combustível e das marés (FARRET; SIMÕES, 2006).

O trabalho foca o uso da energia fotovoltaica, pois a energia solar incidente na terra é diversas vezes maior do que a população mundial consome (MASTERS, 2004) (CEPEL, 2006). Atualmente com o avanço da microeletrônica e eletrônica de potência os custos da fabricação das células fotovoltaicas vêm reduzindo, difundindo o uso destas como fonte de energia.

O monitoramento dos painéis fotovoltaicos, bem como a situação climática onde estes estão instalados é de crucial importância para uma operação segura e para minimização das perdas na conversão da radiação solar em eletricidade.

O trabalho é desenvolvido em parceria com o Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente (CEEMA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), para suprir a demanda de dados para operação de trabalhos com o intuito de integração de fontes alternativas de energia elétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os painéis fotovoltaicos (PV) são arranjos em série e/ou paralelo de células fotovoltaicas com objetivo de aumentar a potência elétrica, pois cada célula possui pequena capacidade de geração (inferior a 3W). Os PV são comercialmente encontrados com potências na faixa de 50 a 300W.

Como exemplo, citam-se os painéis fotovoltaicos fabricados de silício monocristalino, com faixa de eficiência de 10 a 20% (NREL-National Renewable Laboratory, 2004). A tabela 1 apresenta as características elétricas e físicas de um módulo fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF que é utilizado neste trabalho, onde: P_{max} representa a potência máxima; V_{OC} , tensão em circuito aberto; I_{SC} , corrente de curto circuito do painel fotovoltaico e STC, condição padrão de teste (SIEMENS,).

TABELA 1: Características físicas e elétricas de um PV Siemens ProCharger 4JF para as condições padrões de teste¹.

P_{max}	75W
V_{OC}	21,7V
I_{SC}	4,8A
N_s	36
R_s	0,0125 Ω
R_p	1000 Ω
Dimensões	1,2x0,527m

¹ Radiação solar: 1000W/m²;
temperatura: 25°C

Características como não possuir partes móveis, longa vida útil da célula, flexibilidade e modularidade na associação (de poucos watts até megawatts) e simplicidade de uso e manutenção tornam os PV cada vez mais atrativos em diversas aplicações (NREL-National Renewable Laboratory, 2004).

Algumas oportunidades de utilização da energia fotovoltaica são apresentadas na tabela 2.

TABELA 2: Aplicações para utilização de painéis fotovoltaicos.

Aplicação	Descrição
Residências ou Iluminação Pública	Sistemas de iluminação através de fluorescentes compactas possibilitam maior tempo de iluminância;
Alarmes e Cercas Elétricas	Independentes da rede elétrica e possibilita a instalação em lugares remotos;
Telecomunicações	Cabines telefônicas instaladas ao longo de rodovias tornam-se viáveis sem a construção de longas linhas de rede elétrica
Conservação de Alimentos e Medicamentos	Através de refrigeradores desenvolvidos com baixo consumo e alimentação em 12V

Os sistemas fotovoltaicos são comumente encontrados em três principais configurações: sistemas interligados à rede de distribuição (figura 2.1); sistemas isolados com armazenamento de energia (banco de baterias), podendo ou não possuir outro tipo de geração de reserva (figura 2.2), e aplicações na qual a carga é diretamente conectada no PV (figura 2.3) (MASTERS, 2004). A tabela 3 apresenta algumas características, vantagens e desvantagens de cada um destes sistemas.

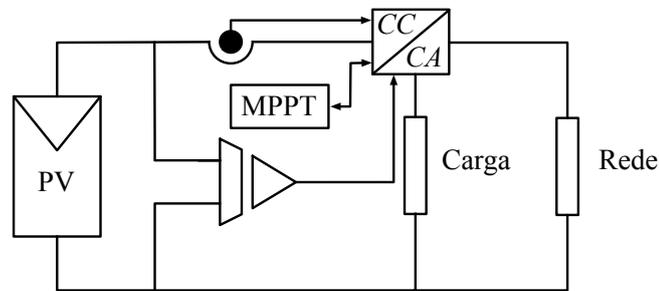


FIGURA 2.1: Sistema Interligado à Rede.

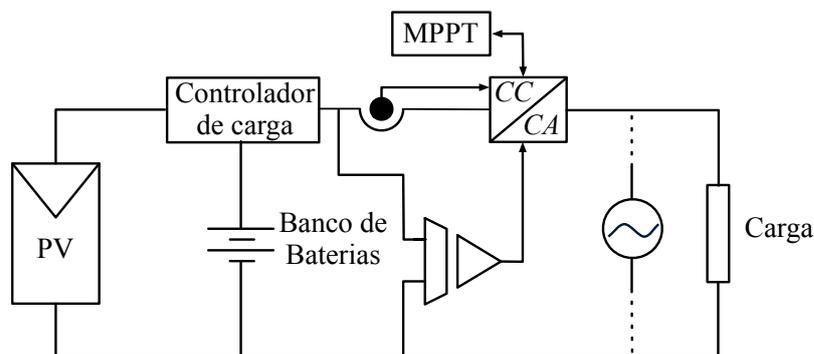


FIGURA 2.2: Sistema Isolado com armazenamento de energia.

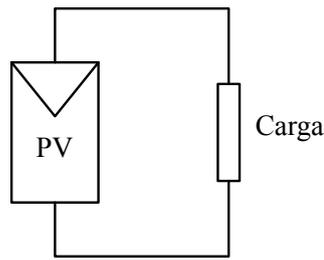


FIGURA 2.3: Sistema Isolado sem armazenamento de energia.

TABELA 3: Características, vantagens e desvantagens de sistemas fotovoltaicos interligados a rede, sistemas isolados com armazenamento de energia e sistemas isolados sem armazenamento de energia.

Sistema	Características	Vantagens	Desvantagens
Interligado à rede	Alimentação da carga em CA através dos PVs ou da rede; Possui conversor de potência (CC-CA); Não necessita armazenamento de energia;	MPPT; Alta confiabilidade; Entregar energia para rede (retorno econômico);	Eletrônica complexa; Burocracia para instalação; Elevado custo dos inversores;
Isolado:			
Com armazenamento de energia	Alimentação da carga em CA através dos PVs; Possui conversor de potência (CC-CA); Possui controlador de carga do banco de baterias; Possibilita associação de outro tipo de geração em paralelo;	MPPT; Confiabilidade;	Confiabilidade dependente do banco de baterias; Elevado custo do banco de baterias;
Sem armazenamento de energia	Carga diretamente conectada aos PVs.	Simples operação e instalação; Baixo custo.	Baixa confiabilidade (a carga só é alimentada quando há irradiação solar).

A figura 2.1 apresenta o diagrama de um sistema interligado, no qual PVs são conectados à rede através de um conversor de potência alimentado em corrente contínua (

CC). Este conversor tem a finalidade de converter os níveis de tensão, fazer a inversão de CC para corrente alternada (CA), no caso dos PVs não suprirem a demanda exigida pela carga, este extrai energia da rede de distribuição, assim aumentando a confiabilidade do sistema. Para a possibilidade dos painéis fotovoltaicos gerarem mais energia que a carga demandada, o conversor de potência envia o excedente para a rede. Este sistema é menos propício a falhas, assim não havendo necessidade de um banco de baterias. Os conversores de potência também fazem a busca pelo ponto de maior potência (MPPT) na curva $I - V$ dos PVs (MASTERS, 2004).

Os sistemas isolados, apresentados na figura 2.2 e 2.3 podem ou não utilizar armazenamento de energia, no caso dos sistemas com banco de baterias, faz-se necessário um dispositivo controlador de carga para que não que haja danos nas baterias por sobrecarga ou descarga profunda (CEPEL, 2006).

A denominação sistemas híbridos é largamente utilizada na bibliografia como aqueles que, desconectado da rede convencional, a energia é suprida por outras fontes de geração como por exemplo: turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos entre outras. A figura 2.4 representa uma possível topologia de sistema híbrido (CEPEL, 2006) (LIMA, 2009).

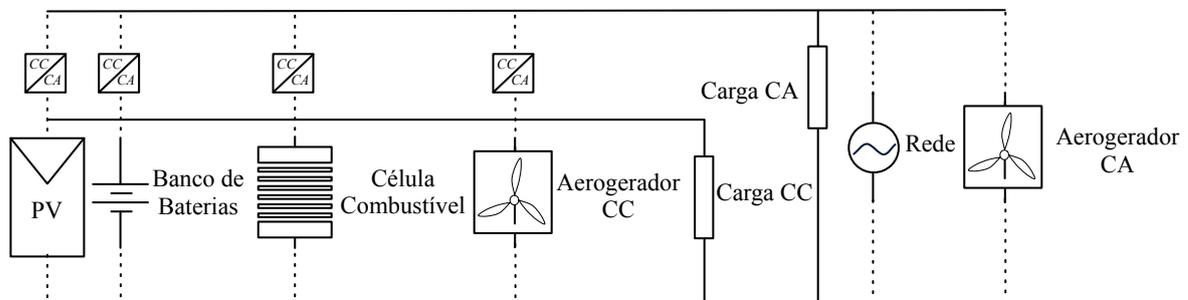


FIGURA 2.4: Elementos de um sistema híbrido de energia.

Todavia os sistemas híbridos e interligados à redes são flexíveis e de maior confiabilidade na geração, demandam de maior complexidade na eletrônica de potência, requerendo inversores, DSP's, banco de baterias e técnicas mais complexas de controle, em que reflete em maior custo de instalação.

2.1.1 MODELO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas são construídas a partir de um material semicondutor capaz de converter energia solar em corrente contínua, sua eficiência de conversão varia de 3 a 31%, dependendo da tecnologia, espectro incidente, temperatura, topologia de projeto e

material da célula (FARRET; SIMÕES, 2006).

Cada célula assemelha-se a um diodo, no qual a radiação solar faz com que elétrons fluam entre a junção $p - n$, para detalhes físicos e construtivos das células consultar (MESSENGER; VENTRE, 2004), (CASTRO, 2002) e (MASTERS, 2004).

O circuito equivalente de um gerador fotovoltaico é apresentado na figura 2.5, na qual a fonte de corrente, I_L , representa a corrente elétrica gerada pelo efeito fotovoltaico, desta forma, proporcional a radiação solar incidente. O diodo, D , é a representação da junção $p - n$ da célula, modelado pela equação de Shockley; V é a tensão obtida nos terminais do painel; a resistência em série, R_s , representa a queda de tensão interna, resistência de condução do gerador e resistência dos contatos terminais; as micro fissuras internas à célula geram uma corrente de fuga, representada pela resistência em paralelo, R_p (LIMA, 2009) (PSIM, 2010).

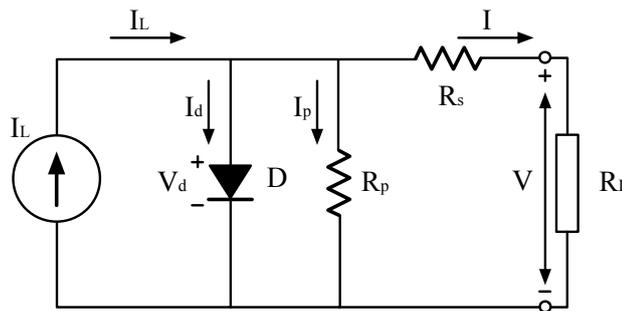


FIGURA 2.5: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

A partir da figura 2.5 obtêm-se a equação 2.1.

$$I = I_L - I_d - I_p \quad (2.1)$$

A corrente I_L , como previamente referido, é dependente da radiação solar pela relação dada na equação 2.2, onde I_{SCo} representa a corrente de curto circuito para T_{ref} ; L , radiação solar incidente no painel, L_o , radiação solar padrão ($1sol = 1000W/m^2$); C_t , coeficiente de temperatura (define como a intensidade luminosa afeta a temperatura da célula fotovoltaica, 0,00312); T_{ref} , temperatura pelo STC e T é definida pela temperatura absoluta da célula.

$$I_L = \frac{L}{L_o} * I_{SCo} + C_t * (T - T_{ref}) \quad (2.2)$$

A corrente I_d que circula no diodo, em função da tensão V_d , é apresentada em 2.3

(BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999) (PSIM, 2010), esta é conhecida como equação de Shockley:

$$I_d = I_o * \left(e^{\frac{qV_d}{AkT}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

$$I_o = I_{so} * \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 * e^{\frac{qE_g}{Ak} * \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (2.4)$$

$$V_d = \frac{V}{N_s} + i * R_s \quad (2.5)$$

onde:

- I_o , corrente de saturação reversa do diodo em função da temperatura;
- q , carga do elétron ($1,60210 * 10^{-19}C$);
- V_d , tensão aplicada aos terminais do diodo;
- A , fator de idealidade de cada célula, medida de quanto perto o diodo se aproxima de um diodo real, (1,2 para silício cristalino) (PVEDUCATION..., 2010);
- k , constante de Boltzmann ($1,38047 * 10^{-23}j/k$);
- I_{so} , corrente de saturação do diodo ($1,59 * 10^{-8}$ para silício cristalino);
- E_g , banda de energia de cada célula, em eV (1,12 para silício cristalino, 1,75 para silício amorfo);
- N_s , número de células em série do módulo;
- R_s , resistência série, em ohms;
- R_p , resistência paralela, em ohms;

A corrente I_p , que flui pela resistência paralela (R_s) é expressa pela equação 2.6.

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} \quad (2.6)$$

Substituindo 2.3, 2.5 e 2.6 em 2.1 é obtida, a características de tensão e corrente do modelo da célula fotovoltaica em 2.7.

$$I = I_L - I_o * \left(\frac{qV_d}{eAkT} - 1 \right) - \left(\frac{V}{N_s} + i * R_s \right) * \frac{1}{R_p} \quad (2.7)$$

Através da equação 2.7, conclui-se que a potência gerada é diretamente proporcional a radiação solar incidente na célula fotovoltaica e a temperatura interfere negativamente nesta.

Para demonstrar o efeito da temperatura e da radiação solar em um painel fotovoltaico, analisa-se graficamente, através das curvas de Corrente VERSUS Tensão e Potência VERSUS Tensão, as equações acima para diversas condições de temperaturas e radiações solares em um PV Siemens ProCharger 4JF. Os resultantes da potência máxima gerada, bem como as condições simuladas são apresentados na tabela 4.

A eficiência de um painel fotovoltaico (η) é calculada de acordo com a equação 2.8, onde a potência solar é o produto da área do painel pela radiação incidente (FARRET; SIMÕES, 2006).

$$\eta = \frac{P_{elétrica}}{P_{solar}} * 100\% \quad (2.8)$$

TABELA 4: Potência máxima e eficiência obtidas para diferentes temperaturas e radiação solar incidentes.

Temperatura ($^{\circ}C$)	Radiação (W/m^2)	$P_{max}(W)$	Eficiência (%)
-25	1000	90,64	14,33
25	1000	74,71	11,81
90	1000	53,03	8,39
25	800	60,31	11,92
25	1500	108,39	11,43

As figuras 2.6a e 2.6b apresentam, respectivamente, as curvas Tensão VERSUS Corrente e Potência VERSUS Tensão do módulo utilizado, para condição de radiação solar incidente de $1000W/m^2$ e temperaturas de -25, 25 e $90^{\circ}C$, nas quais observa-se que a tensão gerada diminui com o aumento da temperatura, por conseguinte, a potência gerada.

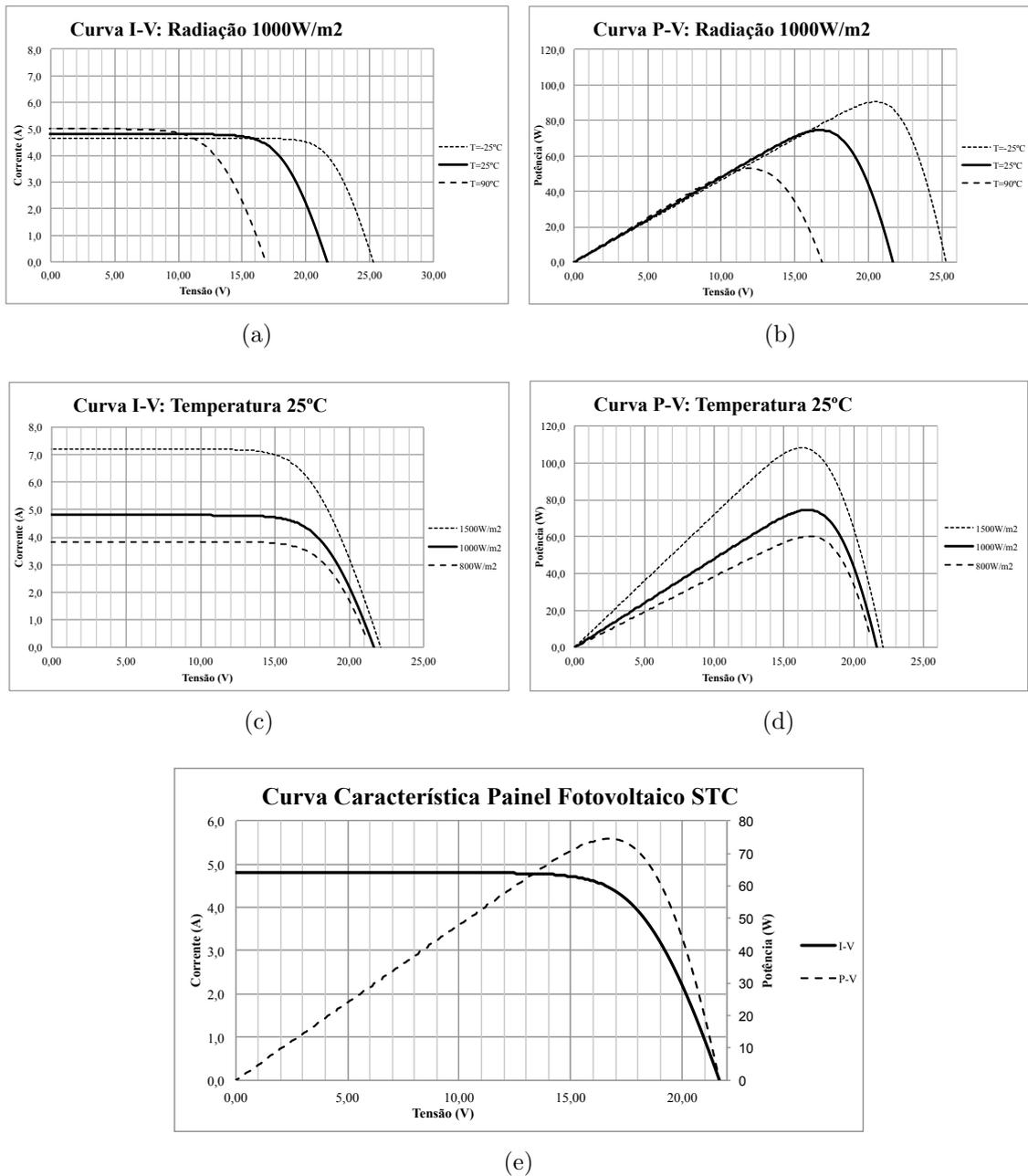


FIGURA 2.6: Curvas I-V e P-V, para radiação de $1000\text{W}/\text{m}^2$ e temperatura de -25 , 25 e 90°C (2.6a e 2.6b) e curvas I-V e P-V, para temperatura de 25°C e radiação solar de 800 , 1000 e $1500\text{W}/\text{m}^2$ (2.6c e 2.6d) de um painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF.

De forma análoga, as figuras 2.6c e 2.6d apresentam, respectivamente, as curvas Corrente VERSUS Tensão e Potência VERSUS Tensão do módulo utilizado, para condições de temperatura de 25°C e radiação solar incidente de $800\text{W}/\text{m}^2$, $1000\text{W}/\text{m}^2$ e $1500\text{W}/\text{m}^2$, nas quais observa-se que a corrente gerada aumenta com o aumento da radiação solar, por conseguinte, a potência gerada.

O aumento da temperatura afeta diretamente a eficiência do painel, tornando-se visível

comparando para as condições de -25°C e 90°C , resultantes em 14,33 e 8,39%, respectivamente.

A curva da figura 2.6e é a resposta de Corrente VERSUS Tensão e Potência VERSUS Tensão do módulo fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF para as condições padrões de teste.

De modo a estimar a produção de energia fotovoltaica faz-se necessário o monitoramento das condições do ambiente no qual o PV encontra-se instalado. Utilizando as variáveis como temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar, pode-se utilizar o modelo matemático apresentado em (TAMIZHMANI et al., 2003) para prever a temperatura de operação do painel e assim fazer a estimativa da energia total produzida.

A equação que prediz a temperatura de operação do PV, em $^{\circ}\text{C}$, em função da temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (m/s) e radiação solar (W/m^2) é apresentada em 2.9, na qual os coeficientes foram obtidos através do treinamento de uma rede neural com dados adquiridos através do monitoramento, ao longo de 2 anos, de 2 parques solares do Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos EUA (TAMIZHMANI et al., 2003).

$$T_{\text{painel}} = 0,943 * T_{\text{ambiente}} + 0,028 * \text{Radiação} - 1,528 * \text{Vel.vento} + 4,3 \quad (2.9)$$

Devido a baixa eficiência da conversão no PV e o alto custo da implementação do sistema (U\$3.000 a U\$5.000 por kW instalado) (ENERGY, 2010), empregam-se métodos computacionais que buscam extrair a máxima potência dos painéis fotovoltaicos. Mecanismos como concentradores e rastreadores solares são utilizados para que maior intensidade luminosa incida ao painel.

A busca pelo ponto de maior potência dos painéis fotovoltaicos é feita por algoritmos computacionais, os métodos mais comuns são: perturbação e observação (P&O), Hill Climbing e método IC (BRITO et al., 2011), porém para a implementação de qualquer um destes métodos faz-se necessário o monitoramento do sistema em questão.

Os concentradores solares são espelhos ou lentes instalados nas proximidades do PV com o objetivo de aumentar a radiação incidente, desta forma substitui-se parte da área de semicondutores por concentradores ópticos, que possuem custo inferior. Contudo, para elevada radiação exige um criterioso monitoramento do painel, pois maior corrente será drenada, e maior será a temperatura de operação (RESOURCES, 2011). Concentradores solares podem aumentar em 44% a potência de saída de um PV, reduzindo assim até 25%

do preço por kW gerado (SANGANI; SOLANKI, 2006).

Os rastreadores solares são dispositivos que mantêm o PV na melhor posição solar possível (perpendicular à radiação solar), estes podem aumentar em 40% a energia produzida (POULEK; LIBRA,).

Os algoritmos de MPPT, em geral, utilizam para seu funcionamento os valores de tensão e corrente gerados pelo modulo fotovoltaico, porém sistemas mais complexos utilizando lógica nebulosa podem ser implementados, combinando o rastreamento do maior ponto de potência elétrica ao maior ponto de potência solar incidente, com o auxílio dos concentradores e rastreadores solares.

Desta forma para a implantação de qualquer método para maximizar a potência extraída dos painéis solares é necessário um criterioso monitoramento, por isso a próxima seção é referente ao projeto de uma plataforma de monitoramento e armazenamento de dados de um sistema de geração fotovoltaico isolado sem banco de baterias.

2.2 MÉTODOS DE MEDIÇÃO E MONITORAMENTO

2.2.1 TEMPERATURA

Há diversas topologias de sensores para a medição de temperatura, tais como, termopares, termistores, RTDs (Resistor Temperature Devices) e circuitos integrados específicos (LM35, por exemplo).

A tabela 5 apresenta algumas características de alguns sensores sensíveis à temperatura (IEA, 2003).

TABELA 5: Características de alguns sensores de temperatura.

Sensor	Termopar	Termistor	RTD	LM35
Elemento Ativo	Dois metais diferentes acoplados	Semicondutor sensível a temperatura	Fio de platina	Semicondutor sensível a temperatura
Saída	Baixo nível de tensão proporcional à temperatura (50uV/°C)	Resistência variável com a temperatura	Resistência variável com a temperatura	Tensão proporcional à temperatura (10mV/°C)
Linearidade	Boa	Ruim	Excelente	Excelente
Custo Aproximado	R\$15,00	R\$2,50	R\$100,00	R\$6,00
Sensibilidade	Baixa	Alta	Baixa	Baixa
Precisão	0,5-1°C	$\geq 0,5 - 1^\circ\text{C}$	0,1°C	0,5°C

2.2.2 CORRENTE CC

A corrente elétrica contínua pode ser medida através de resistor shunt ou por sensores de efeito hall.

A figura 2.7 apresenta o esquema de medição de corrente por um resistor shunt.

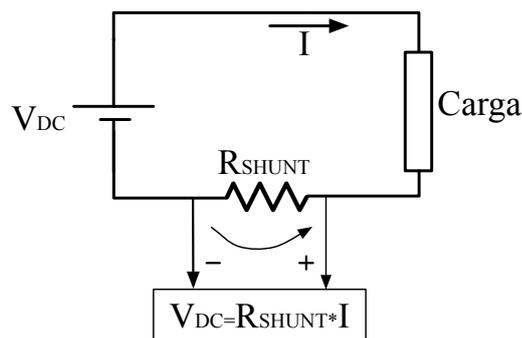


FIGURA 2.7: Esquema de medição de corrente por resistor shunt.

O efeito Hall é surgimento de uma diferença de potencial em um condutor elétrico, transversal ao fluxo de corrente e um campo magnético perpendicular a corrente (EFEITO... , 2011).

2.2.3 VELOCIDADE DO VENTO

A anemometria é a determinação quantitativa da velocidade do vento, em termos de seu módulo e direção. O instrumento utilizado para esse tipo de instrumentação é o anemômetro. Existem diversos tipos destes medidores, a tabela 6 apresenta alguns dos anemômetros mais comuns, baseados em diferentes princípios físicos, com algumas características, vantagens e desvantagens (ALMEIDA, 2004).

TABELA 6: Princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens de alguns anemômetros.

Instrumento	Premissa	Vantagens	Desvantagens
Tubo de Pitot	Baseado no efeito da variação de pressão exercida pelo ar em movimento;	Bom desempenho para altas velocidades;	Baixa precisão em baixas velocidades.
Termo-Anemômetro	Baseado no resfriamento de uma resistência do sensor;	Alta frequência de resposta;	Exigem experiência para a sua utilização;
Anemômetro a Laser (Doppler)	Baseado na diferença de frequência do feixe óptico;	Alta precisão;	Custo relativamente alto;
Anemômetro Ultrasônico	Três conjuntos de emissores e receptores nas direções x, y e z;	Baixo erro de linearidade;	Custo relativamente alto e exige experiência para a sua operação;
Anemômetro de Hélices	Uma hélice faz mover um mecanismo que calcula a velocidade do vento a partir da velocidade de angular;	Largamente difundido em diversas dimensões disponíveis no mercado e faixa de medição 0,1 a 100 m/s;	Dependente da direção do vento; Desgaste mecânico;
Anemômetro de Conchas (Tipo Robinsion)	Um conjunto das conchas faz mover um mecanismo que calcula a velocidade do vento a partir da velocidade de angular.	Independente da direção do vento; Simples construção e largamente difundido.	Desgaste mecânico Estreita faixa de medição, 0-50m/s;

2.2.4 MONITORAMENTO

O padrão de monitoramento de sistemas fotovoltaicos é ditado pela IEC 61724 "Photovoltaic System Performance Monitoring - Guidelines for measurement data exchange and analysis" na qual apresenta as variáveis a serem monitoradas, que são apresentadas na tabela 7 (NREL-National Renewable Laboratory, 2011).

TABELA 7: Variáveis de monitoramento para sistemas fotovoltaicos, segundo IEC 61724.

	Variáveis a serem monitoradas			
Meteorologia	Radiação solar no plano do módulo;	Temperatura do ar;	Velocidade do vento.	
Arranjo Fotovoltaico	Tensão gerada;	Corrente gerada;	Temperatura do módulo;	Características de montagem / Rastreamento.
Carga	Tensão;	Corrente;	Potência.	
Armazenamento de Energia	Tensão de operação;	Corrente de entrada e saída;	Potência de entrada e saída;	
Rede	Tensão;	Corrente de entrada e saída por fase;	Potência de entrada e saída por fase;	
Fontes Reserva	Tensão de saída;	Corrente de saída;	Potência de saída;	

3 METODOLOGIA

Uma plataforma de monitoramento e aquisição de dados para um PV Siemens Pro-Charger 4JF é implementada, para as condições de 30° o ângulo de fixação do painel e carga resistiva de 4Ω na cidade de Santa Maria-RS durante o período de 11 a 14 e 18 a 24 de novembro.

O protótipo desenvolvido monitora, com amostras em intervalos de 5 minutos, tensão, corrente, temperatura ambiente, temperatura do painel e velocidade do vento, a fim de comparar a potência realmente gerada com a estimada nos cálculos baseados nos dados de obtidos por (INMET..., 2011).

3.1 INSTRUMENTAÇÃO

3.1.1 SENSOR DE TEMPERATURA

Para o projeto do termômetro utiliza-se o circuito integrado LM35DZ, este é um sensor de temperatura de precisão, cuja tensão de saída é linearmente proporcional a temperatura na escala Celsius. A faixa de operação deste sensor é de $-55^\circ C$ a $+150^\circ C$ e sua sensibilidade é $10mV/^\circ C$ (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000).

Devido a baixa tensão de saída do LM35DZ e a fim de minimizar maiores interferências por ruídos, um amplificador não inversor de ganho igual a 5,7 é projetado através do circuito da figura 3.8.

A resposta do circuito amplificador, obtida através de um osciloscópio, é indicada na figura 3.9, a qual mostra a relação da tensão de entrada ($CH1$) e a tensão de saída ($CH2$) deste.

De acordo com a figura 3.9 calcula-se um ganho de 5,68, isso dá-se devido a classe de tolerância dos resistores utilizados. De forma à minimizar possíveis erros de não linearidade na escala do sensor, o conjunto sensor-amplificador, este é ensaiado duas vezes para

a condição de aquecimento de 10 a 94°C e duas vezes para a condição de resfriamento de 94 a 10°C.

Os dados obtidos nos ensaios são apresentados no Anexo A pelas tabelas 11, 12, 13 e 14. A partir destes dados plota-se um gráfico Tensão VERSUS Temperatura para cada sensor e através da linha de tendência, a interpolação da reta correspondente a resposta da tensão de saída em função da temperatura, para cada sensor.

A figura 3.10 e 3.11 mostra a curva Tensão VERSUS Temperatura do sensor 1 (equação 3.1) e do sensor 2 (equação 3.1), respectivamente. Com base nestas, destaca-se o coeficiente R^2 de 0,99219 e 0,99571, significando que a reta interpolada aproxima-se 99,22% e 99,57% dos dados ensaiados.

O coeficiente R^2 ou coeficiente de determinação é uma medida de qualidade de um modelo e indica quanto da variância (quão longe os valores se encontram do valor esperado) da variável resposta é explicada pela variância das variáveis explicativas. Seu valor está no intervalo de 0 a 1: Quanto maior, mais explicativo é o modelo (R2, 2012).

$$T(^{\circ}C) = 18,854 * V + 0,3196 \quad (3.1)$$

$$T(^{\circ}C) = 17,073 * V + 1,7792 \quad (3.2)$$

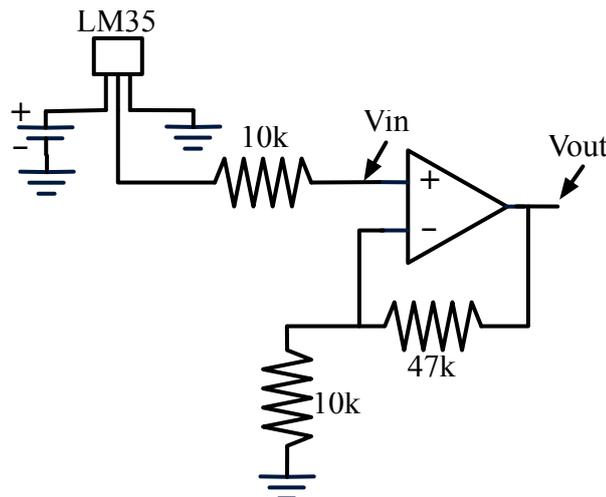


FIGURA 3.8: Circuito amplificador não inversor para o sensor LM35DZ.

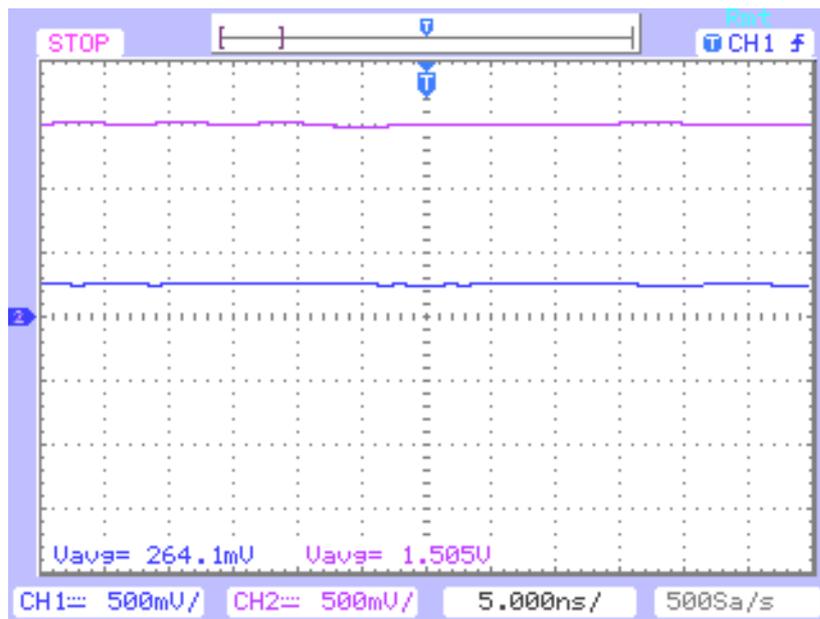


FIGURA 3.9: Resposta do circuito amplificador para tensão de entrada (*CH1*) e tensão de saída (*CH2*) .

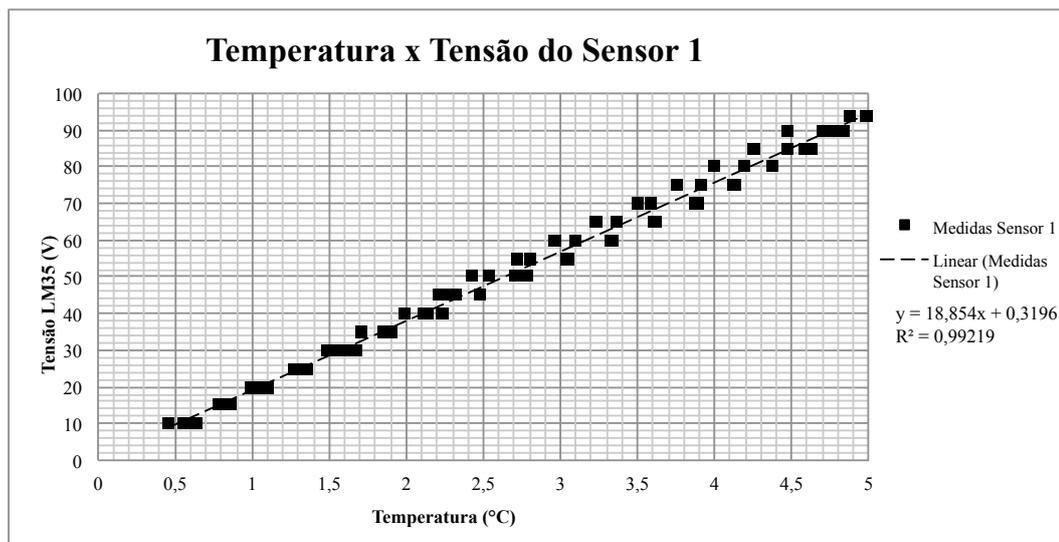


FIGURA 3.10: Dados obtidos no ensaio de calibração de aquecimento e resfriamento do sensor 1.

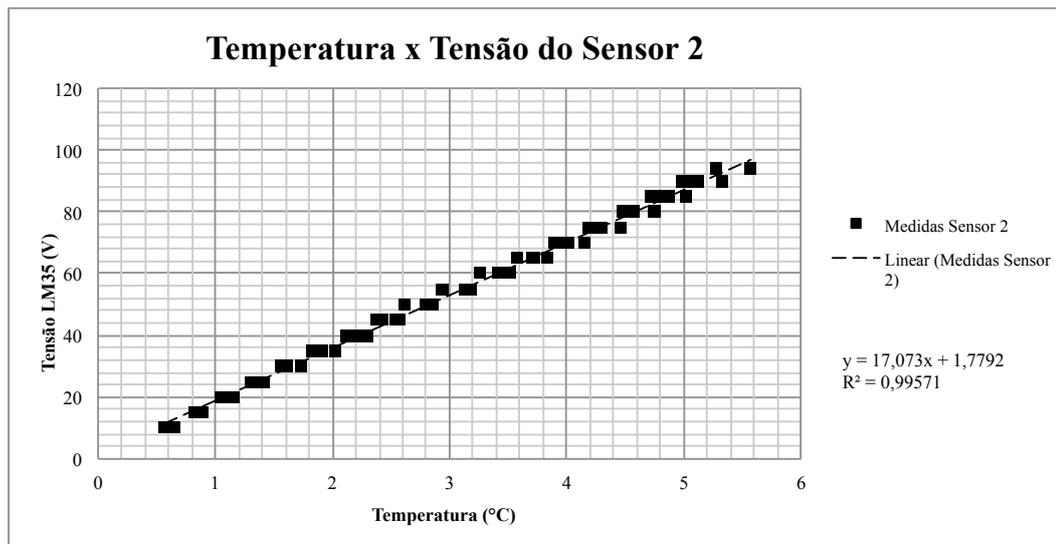


FIGURA 3.11: Dados obtidos no ensaio de calibração de aquecimento e resfriamento do sensor 2.

3.1.2 SENSOR DE TENSÃO

O sensor de tensão consiste de um divisor resistivo, apresentado no circuito da figura 3.12 e equacionado pela equação 3.3, onde a tensão V_{in} é provida do painel fotovoltaico e a tensão V_{out} alimenta a plataforma de aquisição de dados.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} * V_{in} \quad (3.3)$$

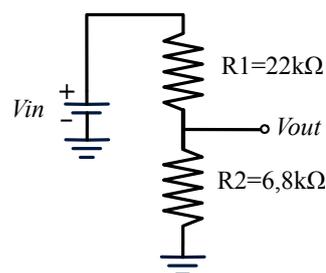


FIGURA 3.12: Circuito sensor de tensão.

Para garantir a linearidade na entrada do sistema de aquisição de dados, o sensor é projetado para que drene no máximo 1/10 da potência nominal dos resistores, ou seja, $25mW$.

Um ensaio variando-se a tensão de entrada do sensor entre 0 e 20V é feito com o intuito de verificar a linearidade deste, resultando no gráfico da figura 3.13 e equação 3.4, a qual apresenta a curva obtida utilizando os valor de tensão de entrada e saída do sensor,

baseada nos dados a tabela 15 do Anexo B.

$$V_{out} = 4,1775 * V_{in} \quad (3.4)$$

Através do ensaio do sensor obtém-se o ganho do circuito em 0,23937, em um coeficiente R^2 igual a 0,9999.

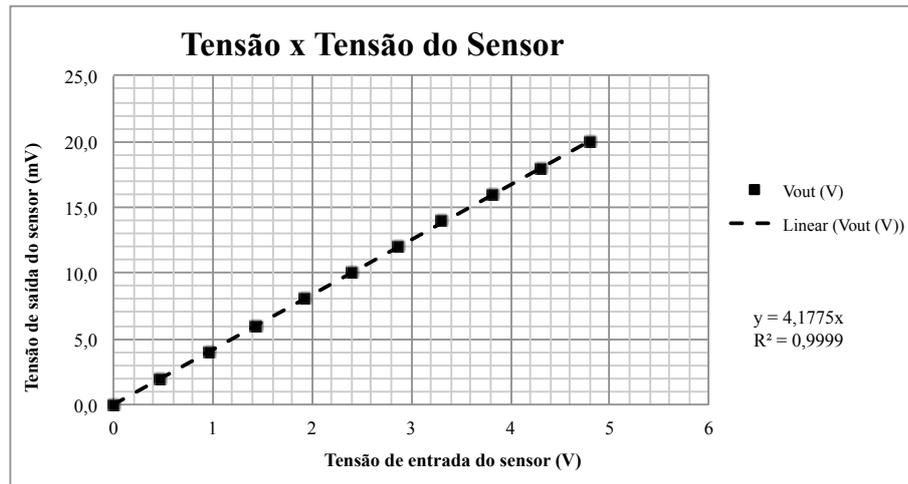


FIGURA 3.13: Dados obtidos no ensaio de calibração do sensor de tensão.

3.1.3 SENSOR DE CORRENTE

Para o projeto do amperímetro utiliza-se o circuito integrado ACS712 que é um sensor de corrente linear baseado no efeito hall (ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC.,). Esse sensor possui sensibilidade de 185mV/A para a faixa de -5 a $+5$ A; em 0A este possui uma componente DC de 2,5V, por isso e afim de aumentar a tensão de saída do sensor utiliza-se uma amplificação com 2 estágios.

O primeiro estágio de amplificação remove a componente DC do sensor, para medições entre 0 a 5A; o segundo estágio é um amplificador integrador que opera como filtro ativo. O circuito do amplificador é apresentado na figura 3.14.

De forma análoga aos sensores de temperatura e de tensão, ensaia-se o circuito sensor de corrente variando a corrente de entrada e medindo a tensão de saída deste, no qual resulta nos dados da tabela 16 do Anexo C, e com base nesta, o gráfico da figura 3.15 que apresenta um coeficiente R^2 igual a 0,9989 e equação 3.5.

$$V_{out} = 1,9126 * I \quad (3.5)$$

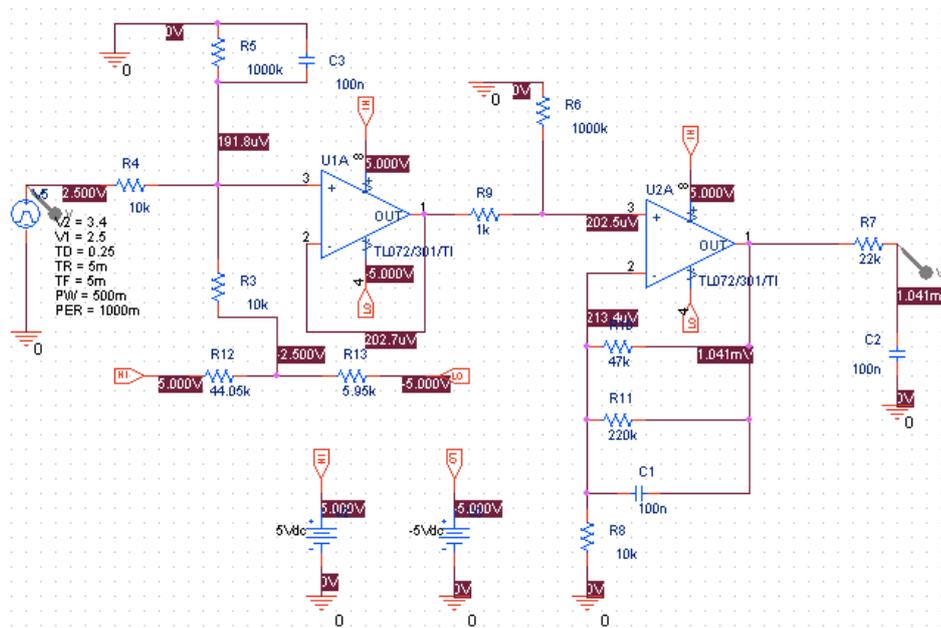


FIGURA 3.14: Circuito de amplificação do sinal de saída do sensor de corrente.

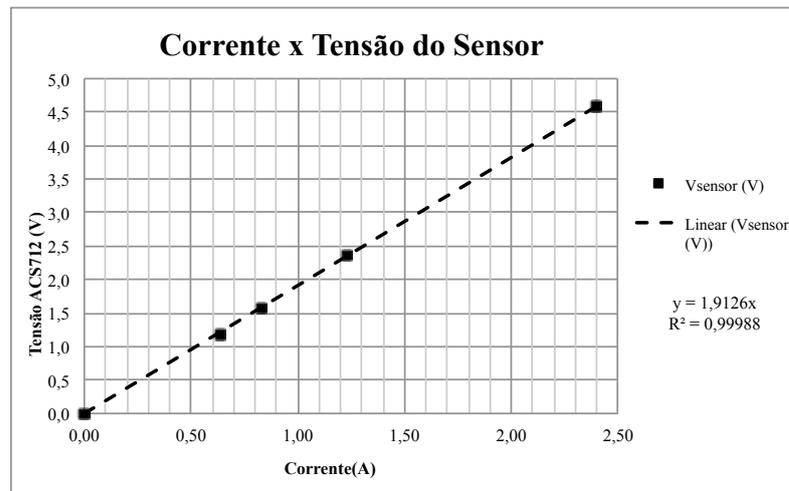


FIGURA 3.15: Dados obtidos no ensaio de calibração do sensor de corrente.

3.1.4 ANEMÔMETRO

O anemômetro de conchas, ou do tipo Robinson, demonstrado pelo seu projeto em uma vista explodida na figura 3.16, consiste em um disco girante com 60 cavidades dispostas ao longo de seu perímetro, na qual um sensor óptico, composto por um fototransistor e um led emissor infra-vermelho, é instalado de tal forma que disco separa o led e o fototransistor. Com o auxílio de um circuito comparador, o qual tem finalidade de modelar a onda, quando a cavidade atravessar o sensor, será produzido um sinal em formato de uma onda quadrada.

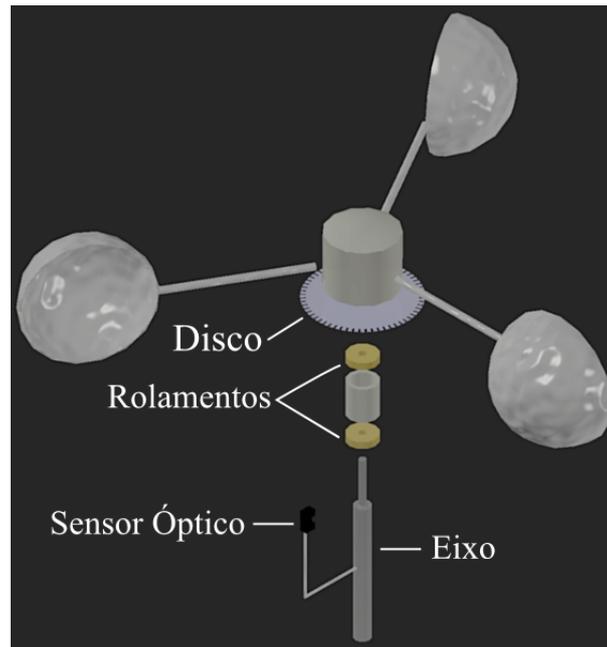


FIGURA 3.16: Protótipo do anemômetro.

A velocidade angular do anemômetro, ω , pode ser calculada pela equação 3.6, onde R é o raio do disco, em metros (0,26) e f , a frequência da onda quadrada.

$$\omega = 2 * \pi * R * \frac{f}{60} \quad \omega = \frac{2 * \pi * f * 0,26}{60} \quad \omega = 0,0272 * f \text{ (m/s)} \quad (3.6)$$

Através de um osciloscópio obtém-se a figura 3.18 pelo circuito da figura 3.17, na qual $CH1$ representa a tensão V_{in} e $CH2$ representa a tensão V_{out} .

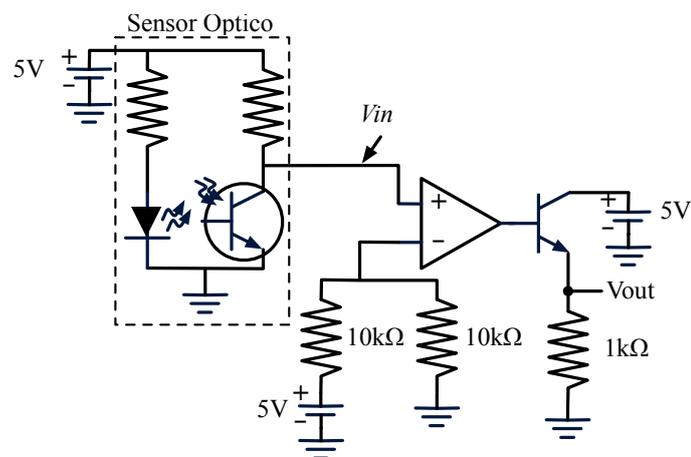


FIGURA 3.17: Circuito do sensor óptico para o cálculo da velocidade do vento.

Para a aferição do anemômetro construído utiliza-se um equipamento comercial, Minipa MDA-10, montado como o esquema da figura 3.19. A tabela 17 mostra os dados

obtidos no ensaio, com base nestes dados plota-se gráfico da figura 3.20, o qual apresenta um fator R^2 igual a 0,8021, porém a reta interpolada, equação 3.7 , difere da reta ideal em apenas 5% .

$$\omega = 0,0286 * f \quad (m/s) \quad (3.7)$$

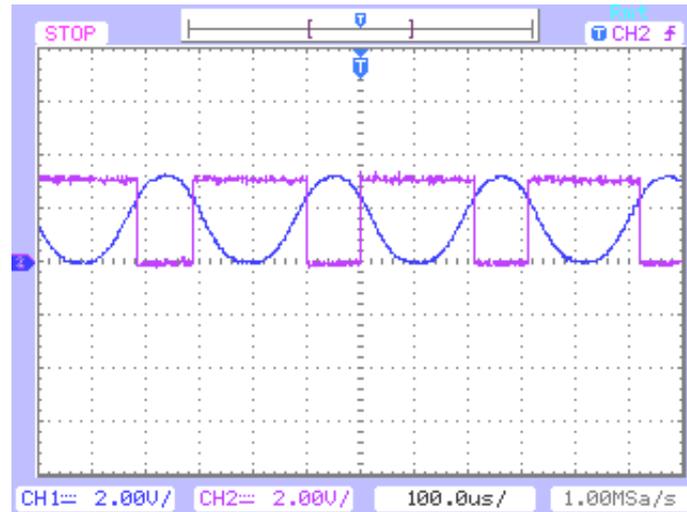


FIGURA 3.18: Tensão de entrada (CH1) e tensão de saída (CH2) do circuito comparador.

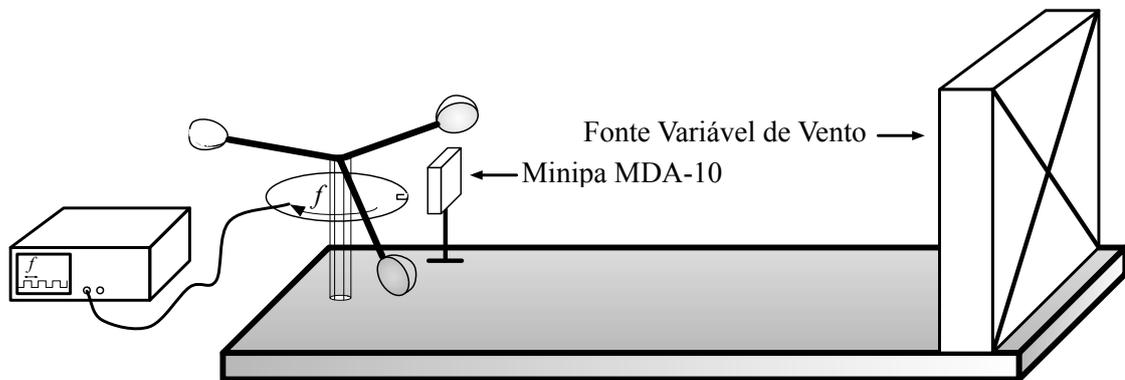


FIGURA 3.19: Esquema de montagem para aferição do anemômetro.

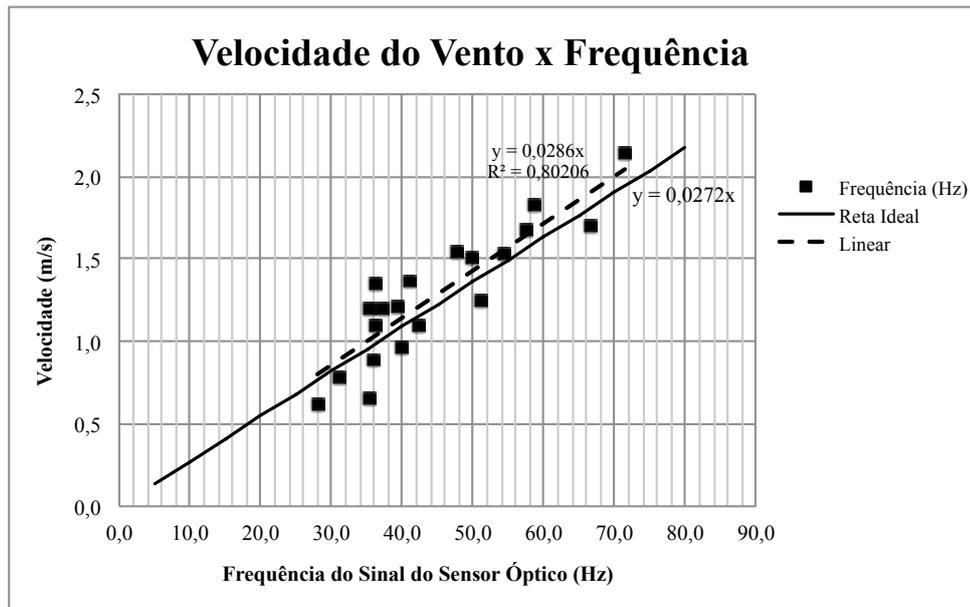


FIGURA 3.20: Velocidade do vento VERSUS frequência do sinal do sensor óptico.

3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

3.2.1 AMBIENTE VIRTUAL DE INSTRUMENTAÇÃO LABVIEW

O software **LabVIEW**[®] permite desenvolver sistemas sofisticados de medição, teste e controle, utilizando um ambiente gráfico de programação (NI, 2011)

O protótipo desenvolvido utiliza uma placa de aquisição de dados NI USB-6251 fabricada pela **National Instrument**[®] e permite a leitura de cada um dos sensores em tempo real com a possibilidade dos dados serem armazenados no computador.

A figura 3.21 apresenta o diagrama de blocos da etapa do programa desenvolvido responsável pela leitura dos dados da placa de aquisição, filtragem digital de ruídos dos sensores de temperatura e equacionamento de cada sensor.

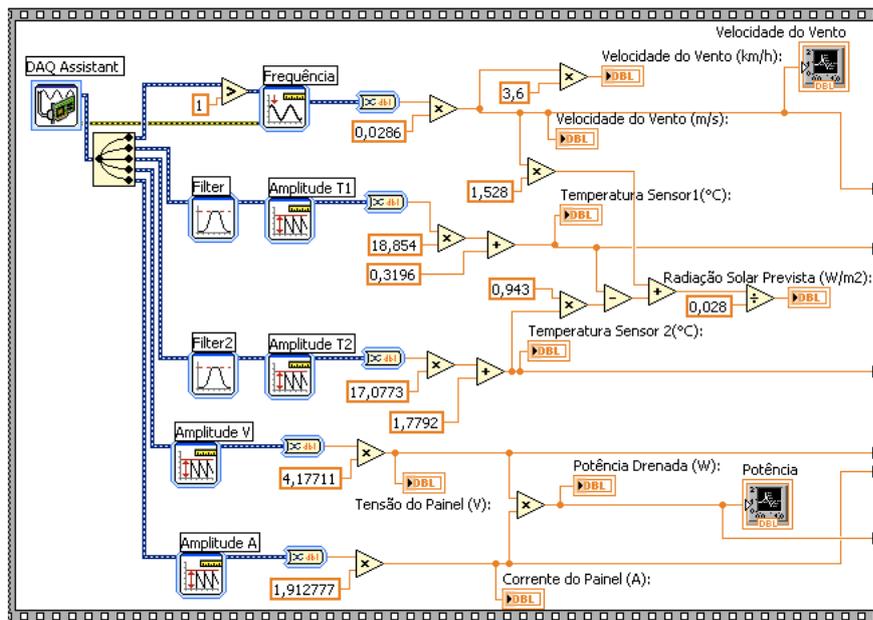


FIGURA 3.21: Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido, etapa de aquisição, condicionamento e equacionamento dos dados sensores.

A figura 3.22 apresenta o diagramas de blocos da etapa de armazenamento de dados, no qual os dados são concatenados em uma tabela para serem armazenados no disco rígido do computador. A figura 3.23 apresenta o arquivo de registro dos dados dos sensores.

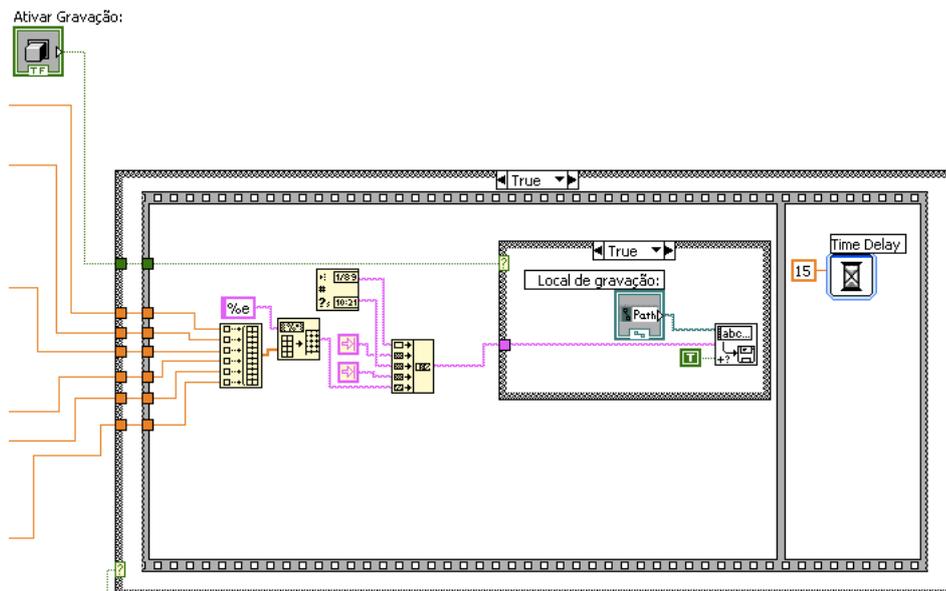


FIGURA 3.22: Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido, etapa de concatenação e formatação dos dados dos sensores.

Data	Hora	ve1-do-vento	Temppainel	TempAmb	Tensão	Corrente
31/10/2011	19:56	2,840106E+0	3,505834E+1	2,643547E+1	2,451240E+0	0,000000E+0
31/10/2011	19:57	2,840106E+0	3,517847E+1	2,632767E+1	2,451437E+0	0,000000E+0
31/10/2011	19:57	2,840106E+0	3,520597E+1	2,629935E+1	2,451602E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:00	2,840106E+0	3,528243E+1	2,614222E+1	2,451314E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:00	2,840106E+0	3,528486E+1	2,610652E+1	2,451334E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:00	2,840106E+0	3,529376E+1	2,615051E+1	2,451309E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:00	2,840106E+0	3,529908E+1	2,609429E+1	2,450846E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:15	2,840106E+0	3,531578E+1	2,562434E+1	2,451241E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:15	2,840106E+0	3,532248E+1	2,563322E+1	2,451816E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:15	2,840106E+0	3,531507E+1	2,563791E+1	2,450704E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:15	2,840106E+0	3,532328E+1	2,558603E+1	2,451526E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:30	2,840106E+0	3,528149E+1	2,550416E+1	2,451385E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:30	2,840106E+0	3,528063E+1	2,549955E+1	2,451307E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:30	2,840106E+0	3,528346E+1	2,550220E+1	2,451126E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:30	2,840106E+0	3,529208E+1	2,550638E+1	2,451079E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:45	2,840106E+0	3,533424E+1	2,521125E+1	2,451781E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:45	2,840106E+0	3,534337E+1	2,521173E+1	2,450741E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:45	2,840106E+0	3,533968E+1	2,521729E+1	2,450887E+0	0,000000E+0
31/10/2011	20:45	2,840106E+0	3,545234E+1	2,520492E+1	2,451308E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:00	2,840106E+0	3,534164E+1	2,518856E+1	2,451069E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:00	2,840106E+0	3,533478E+1	2,518058E+1	2,450476E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:00	2,840106E+0	3,532688E+1	2,517742E+1	2,451146E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:00	2,840106E+0	3,533599E+1	2,517704E+1	2,451288E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:15	2,840106E+0	3,561006E+1	2,508523E+1	2,451307E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:15	2,840106E+0	3,551054E+1	2,508664E+1	2,451162E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:15	2,840106E+0	3,557875E+1	2,508676E+1	2,451046E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:15	2,840106E+0	3,555541E+1	2,507885E+1	2,451356E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:30	2,840106E+0	3,564306E+1	2,493736E+1	2,450881E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:30	2,840106E+0	3,564327E+1	2,493846E+1	2,450973E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:30	2,840106E+0	3,565020E+1	2,493718E+1	2,450756E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:30	2,840106E+0	3,562302E+1	2,496034E+1	2,451113E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:45	2,840106E+0	3,564675E+1	2,485310E+1	2,451225E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:45	2,840106E+0	3,565191E+1	2,486561E+1	2,451129E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:45	2,840106E+0	3,563701E+1	2,482217E+1	2,450944E+0	0,000000E+0
31/10/2011	21:45	2,840106E+0	3,562809E+1	2,482598E+1	2,451158E+0	0,000000E+0
31/10/2011	22:00	2,840106E+0	3,558789E+1	2,468132E+1	2,450817E+0	0,000000E+0
31/10/2011	22:00	2,840106E+0	3,559229E+1	2,470961E+1	2,450896E+0	0,000000E+0
31/10/2011	22:00	2,840106E+0	3,557367E+1	2,457198E+1	2,450959E+0	0,000000E+0
31/10/2011	22:00	2,840106E+0	3,557256E+1	2,452046E+1	2,450885E+0	0,000000E+0
31/10/2011	22:15	2,840106E+0	3,598120E+1	2,471544E+1	2,450765E+0	0,000000E+0
31/10/2011	22:15	2,840106E+0	3,600836E+1	2,474003E+1	2,450992E+0	0,000000E+0

FIGURA 3.23: Arquivo de registro dos dados obtidos através do protótipo desenvolvido.

A figura 3.24 descreve a lógica digital utilizada na comparação do minuto atual com os valores 5, 10, ..., 55, para que os dados sejam armazenados a cada cinco minutos em horário regular.

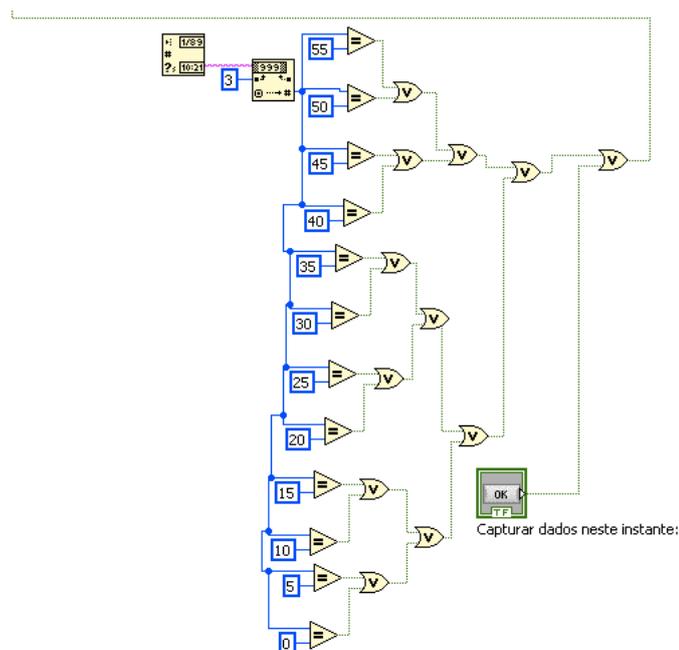


FIGURA 3.24: Diagrama de blocos do protótipo desenvolvido, etapa de contagem do tempo de armazenamento dos dados.

A interface do sistema é apresentado na figura 3.25, esta mostra os dados de velocidade do vento, temperatura dos sensores, tensão e corrente e potência gerados pelo PV.

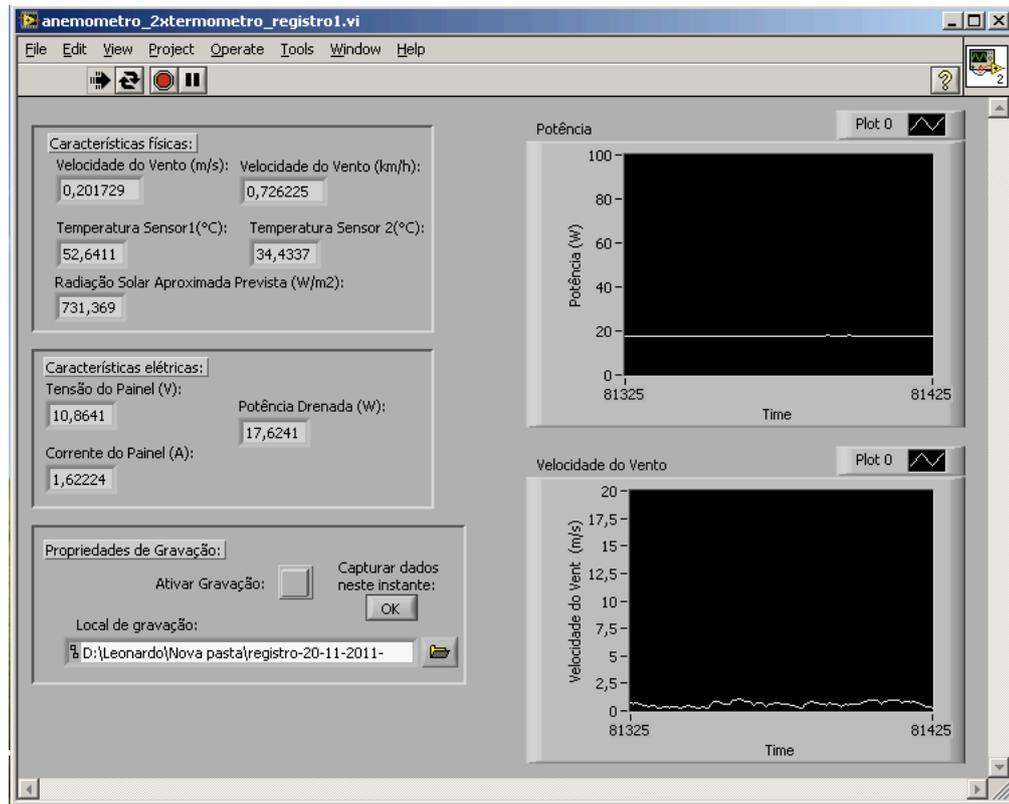


FIGURA 3.25: Interface homem-máquina do protótipo desenvolvido.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA PLATAFORMA DESENVOLVIDA

A plataforma desenvolvida, esquematizada pela figura 3.26, é um sistema de monitoramento e aquisição de dados, ou seja somente há fluxo de dados dos sensores para a placa de aquisição USB NI-6251. Não só esse hardware (USB NI-6251) é capaz de receber dados dos sensores mas também enviar informações para sistemas de controle para chaves de conversores ou compor algoritmos de rastreamento da máxima potência dos painéis fotovoltaicos, desta forma este encontra-se sobredimensionado para a aplicação atual.

A figura 3.27 apresenta uma possibilidade de expansão da plataforma desenvolvida. Assim aumentando o fator de utilização do hardware, o qual está sobredimensionado para a atual aplicação, desta forma reduzindo o custo por função executada.

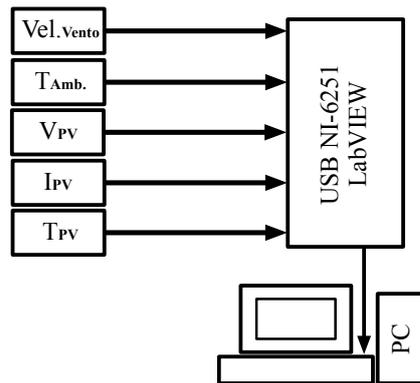


FIGURA 3.26: Plataforma de monitoramento e aquisição de dados desenvolvida.

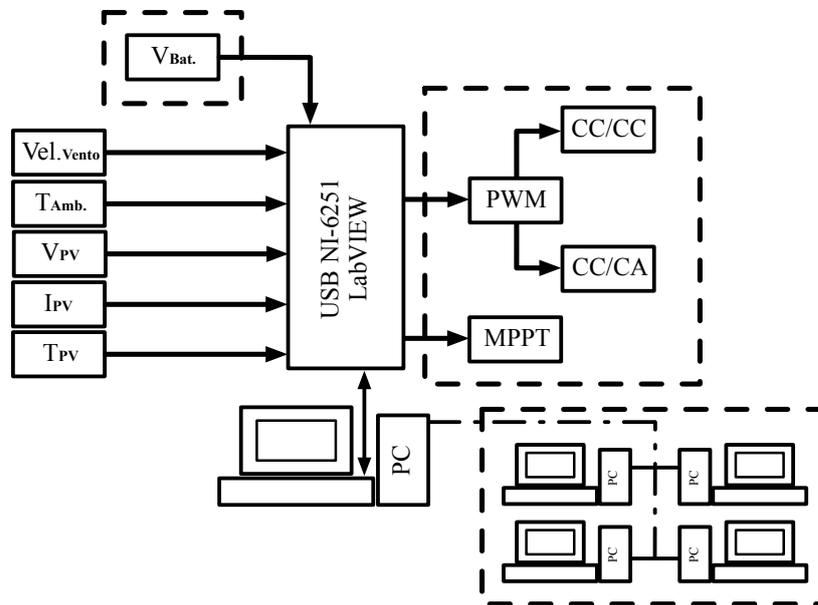


FIGURA 3.27: Possibilidades de expansão da plataforma desenvolvida.

No mercado há diversas opções de estações meteorológicas disponíveis, cada uma apresentando vantagens e desvantagens em relação ao sistema desenvolvido.

As principais vantagens desta plataforma é a versatilidade, pois devido a linguagem de programação gráfica ser sugestiva e de fácil alteração, ampliações de software tornam-se possíveis.

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS TEÓRICOS

O dados climáticos do mês de novembro da região de Santa Maria, Rio Grande do Sul (-29.71329,-53.717855), são apresentados, juntamente com a potência máxima e energia prevista de geração, na tabela 8.

TABELA 8: Características climáticas do mês de novembro para Santa Maria-RS e previsão de geração para um PV Siemens ProCharger 4JF.

Data	Hora	T. Amb. ¹ (°C)	Vel. Vento ¹ (m/s)	L ¹ ($\frac{W}{m^2d}$)	Insolação diária ² (h)	T. Prevista ³ (°C)	P _{max} ⁴ (W)	Energia Pre- vista (kWh)
11	Média	21,08	3,18	506,70	11,00	33,51	37,04	0,4075
12	Média	21,31	5,19	621,48	11,00	33,86	45,28	0,4981
13	Média	21,64	5,29	506,54	11,00	30,81	37,44	0,4118
14	Média	21,62	4,70	395,68	11,00	28,58	29,45	0,3239
18	Média	25,48	4,19	651,99	11,00	40,17	46,16	0,5078
19	Média	27,59	3,18	633,18	11,00	43,20	44,26	0,4869
20	Média	24,80	3,23	257,96	11,00	29,97	18,94	0,2084
21	Média	19,98	2,14	76,60	11,00	22,01	5,31	0,0584
22	Média	22,53	3,67	267,83	11,00	27,45	19,84	0,2182
23	Média	22,91	3,29	673,85	11,00	39,74	47,77	0,5254
24	Média	23,57	2,56	631,61	11,00	40,30	44,73	0,4920
							Total	4,14
Média Cal- culada		22,95	3,69	474,86	11,00	33,60	34,20	0,3762
Média Mensal por dia²		22,2	3,3	887,14	11,00	45,03	60,69	0,4249

¹ Dados dos registros das estações automáticas em (INMET..., 2011);

² (NASA, 2011);

³ Equação 2.9;

⁴ Equação 2.1.

Para a predição da potência gerada, utiliza-se a equação 2.9, na qual faz o uso dos

dados apresentados na tabela 8, resultando em uma potência máxima média prevista de 34,20W para as condições climáticas obtidas em (ATLAS-SOLARIMÉTRICO, 2000), demonstra uma diferença de 56,35% comparando-se com a média mensal obtida em (NASA, 2011). Portanto faz-se uma análise com os dados dos registos em (INMET..., 2011).

De acordo com a equação 2.8, calcula-se, em 4.1, a eficiência média do painel durante o tempo monitorado, prevendo 11,39% de rendimento.

$$\eta = \frac{P_{elétrica}}{P_{solar}} * 100\%$$

$$\eta = \frac{34,20}{1,20 * 0,527 * 474,86} * 100\%$$

$$\eta = 11,39\%$$
(4.1)

A energia produzida média prevista equivalente para este intervalo de tempo comporta-se de acordo com o gráfico da figura 4.28 e a tabela 8, a qual apresenta a geração de 4,14kWh.

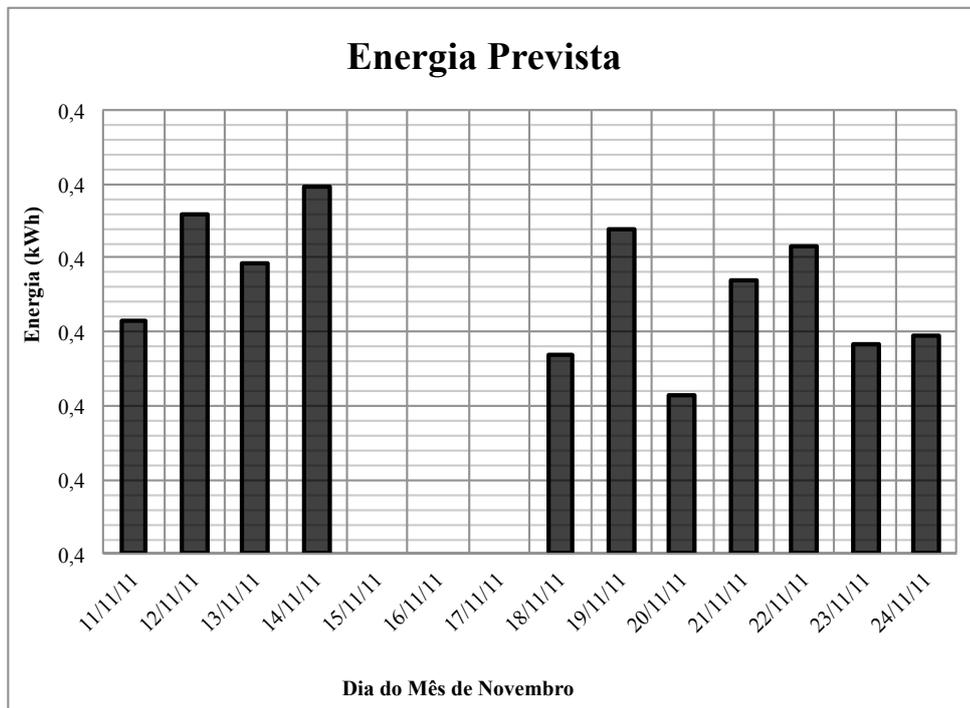


FIGURA 4.28: Energia prevista para geração no mês de novembro.

A geração total durante o período monitorado é 1,86kWh, equivalendo a 44,92% da energia prevista. Isso implica que há maior potencial para geração, porém para maximizar a potência gerada faz-se necessário algoritmos de MPPT.

4.2 RESULTADOS PRÁTICOS OBTIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Através do monitoramento e aquisição de dados compara-se a energia gerada pelo painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF com a prevista nos cálculos teóricos.

A tabela 9 apresenta a comparação da insolação, potência média e energia prevista e gerada para cada dia monitorado. Para o cálculo da insolação diária obtida, contabiliza-se o tempo a partir do horário em que o painel alcançou 5W gerados.

Com a análise da tabela 9, visualiza-se o gráfico da figura 4.29, na qual destaca-se o dia 13, em que a geração superou em 4,00% a energia prevista e o dia 21 no qual que não houve energia gerada devido à chuva ao longo do dia.

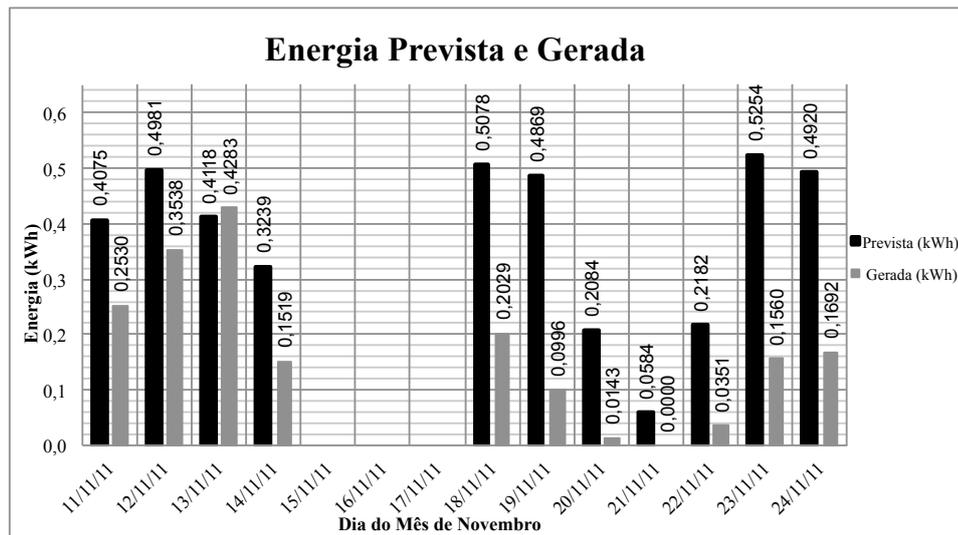


FIGURA 4.29: Comparação da energia prevista e gerada para o PV Siemens ProCharger 4JF no mês de novembro.

Para a análise dos dados de potência gerada, utilizam-se histogramas de frequência em intervalos de 5W para cada dia. A figura 4.30 apresenta o histograma de frequência da potência gerada no dia 13 de novembro, representando a distribuição de frequência da tabela 10, nas quais verifica-se que a maior ocorrência de potência gerada é na faixa de 25 a 30W e 35 a 40W.

A figura 4.31 especifica o comportamento da potência e a temperatura ambiente ao longo do dia 13 de novembro. Devido aos sensores de temperatura não estarem instalados neste dia, os dados de temperatura ambiente utilizado são baseados no registo do (INMET..., 2011). Com a análise desta figura, constata-se a temperatura ambiente média de 21,64°C, implicando em uma geração média de 30,59W.

TABELA 9: Comparação de potência, energia e insolação prevista e gerada para o PV Siemens ProCharger 4JF no mês de novembro.

Previsão de Geração para o Mês de Novembro				Geração Obtida no Mês de Novembro			Variação (%)
Dia	Insolação diária (h)	Potência média (W)	Energia Prevista (kWh)	Insolação diária (h)	Potência Média (kW)	Energia Gerada (kWh)	
11/11	11	60,10	0,4075	8,92	28,36	0,25	37,91
12/11	11	61,14	0,4981	9,17	38,58	0,35	28,97
13/11	11	60,66	0,4118	14	30,59	0,43	-4,00
14/11	11	61,40	0,3239	7	21,70	0,15	53,10
18/11	11	59,77	0,5078	10,5	19,33	0,20	60,04
19/11	11	60,98	0,4869	5,5	18,11	0,10	79,54
20/11	11	59,39	0,2084	1,83	7,82	0,01	93,13
21/11	11	60,49	0,0584	0,00	0,00	0,00	100,00
22/11	11	60,83	0,2182	6,58	5,34	0,04	83,91
23/11	11	59,88	0,5254	9,67	16,13	0,16	70,31
24/11	11	59,96	0,4920	9,33	18,13	0,17	65,62
Total			4,14			1,86	54,96

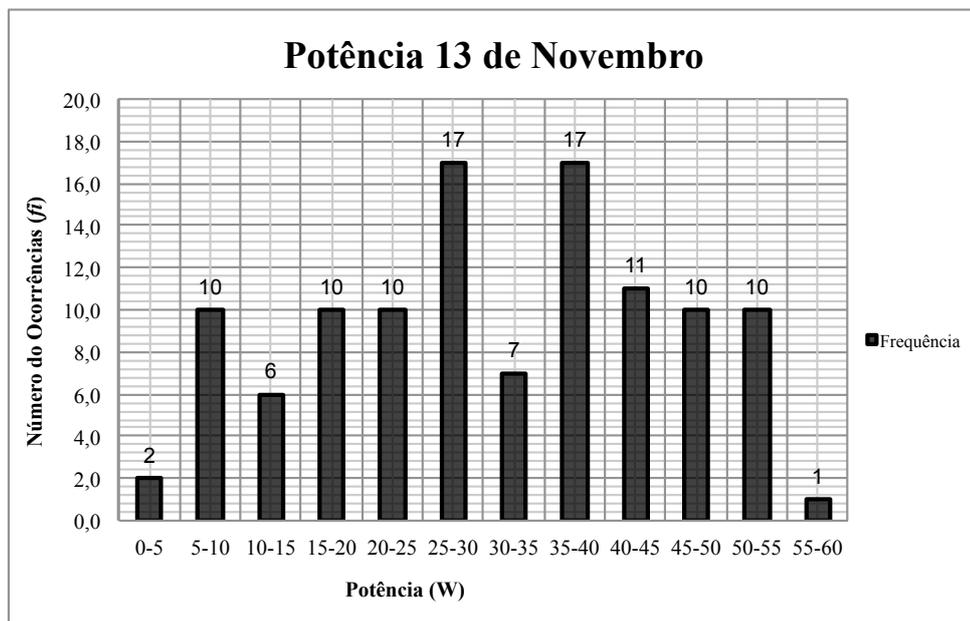


FIGURA 4.30: Histograma de frequência para potência gerada por um painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF durante o dia 13 de novembro.

A figura 4.32 agrupa os valores de temperatura ambiente, temperatura do PV e potência gerada ao longo do dia 24 de novembro, na qual compõe os picos de potência coincidindo com os picos de temperatura do painel, isso caracteriza o aquecimento devido a circulação de maior corrente. A temperatura ambiente média foi 33,6°C e a temperatura média do PV, 47,55°C, combinando em uma potência média gerada de 18,13W.

TABELA 10: Distribuição de frequência da potência gerada de um PV Siemens Pro-Charger 4JF no dia 13 de mês de novembro.

<i>Faixa de Potência</i>	<i>Frequência (fi)</i>	<i>Frequência Relativa (fri%)</i>	<i>Média</i>
0-5	2	1,80%	5
5-10	10	9,01%	75
10-15	6	5,41%	75
15-20	10	9,01%	175
20-25	10	9,01%	225
25-30	17	15,32%	467,5
30-35	7	6,31%	227,5
35-40	17	15,32%	637,5
40-45	11	9,91%	467,5
45-50	10	9,01%	475
50-55	10	9,01%	525
55-60	1	0,90%	57,5
Total	111	100,00%	30,74

Destacou-se a influência negativa na temperatura na geração fotovoltaica ao comparar as figuras 4.31 e 4.32, dois dias ensolarados porém com temperaturas médias distintas, para a qual um aumento de 59,26% na temperatura verificou um decréscimo de 59,27% na potência média gerada .

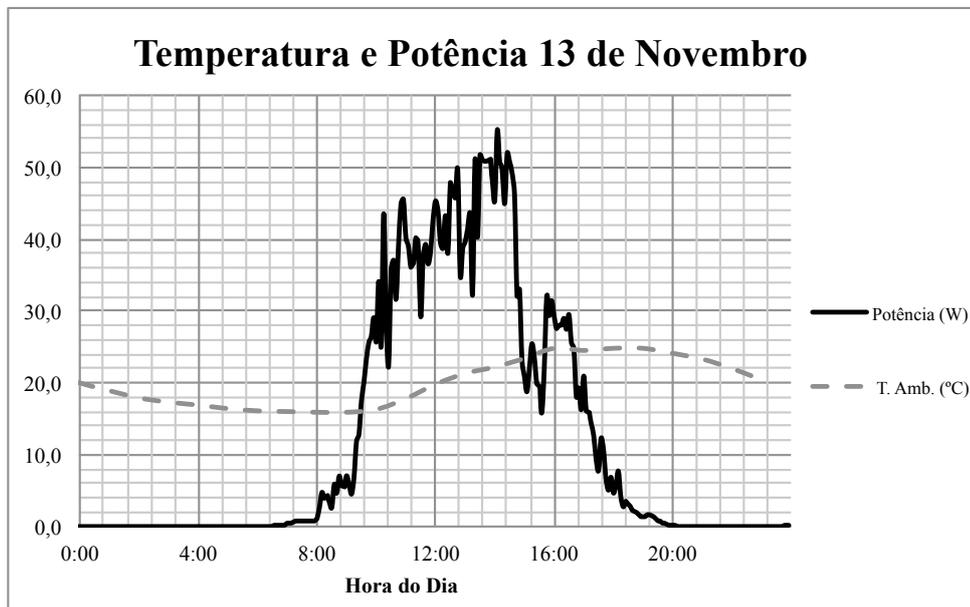


FIGURA 4.31: Potência gerada pelo painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF e temperatura ambiente ao longo do dia 13 de novembro.

A figura 4.33 sintetiza os dados de temperatura do painel e velocidade do vento ao longo do dia 24 de novembro, na qual torna visível a queda de temperatura do painel nos picos de incidência de vento.

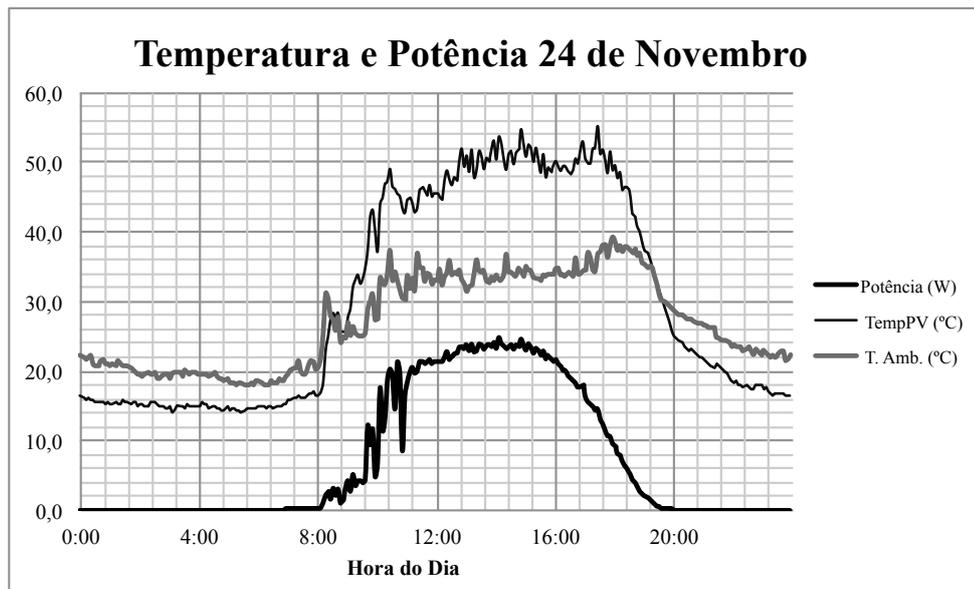


FIGURA 4.32: Temperatura ambiente, temperatura do painel e potência gerada ao longo do dia 24 de novembro.

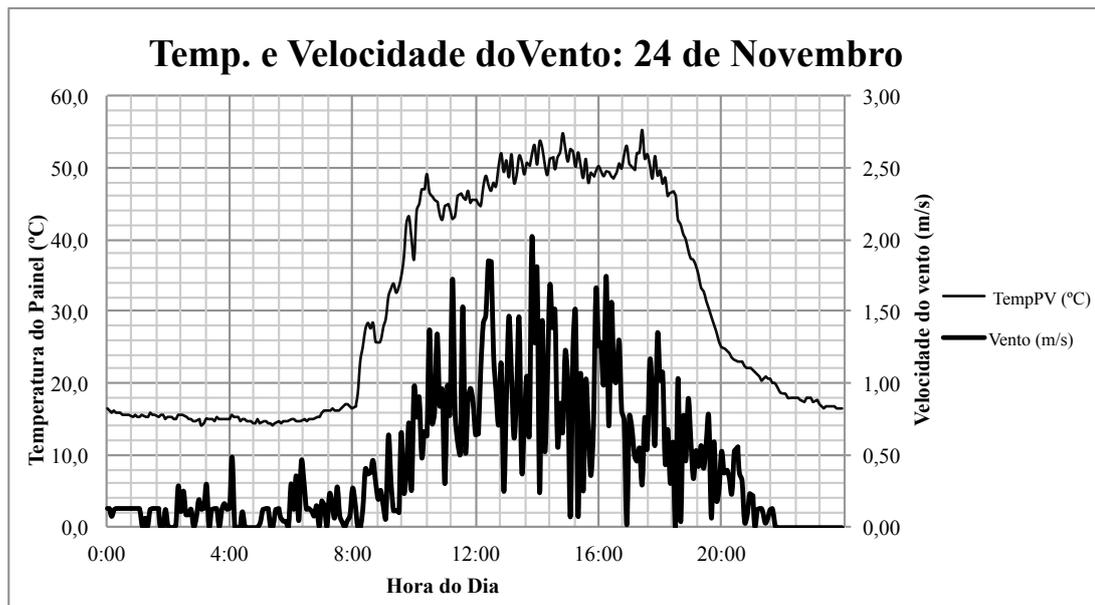


FIGURA 4.33: Velocidade do vento e temperatura do painel fotovoltaico Siemens Pro-Charger 4JF ao longo do dia 24 de novembro.

A figura 4.34 compara a potência gerada e a velocidade do vento ao longo do dia 24 de novembro, na análise desta não pôde afirmar a influência do vento diretamente na geração de energia. Esta falta de equivalência pode ser revista, pois o anemômetro construído é do tipo Robinson, tal análise poderia ser melhor detalhada na instalação de um anemômetro do tipo efeito Doppler e um piranômetro, assim compara-se a radiação solar e velocidade do vento.

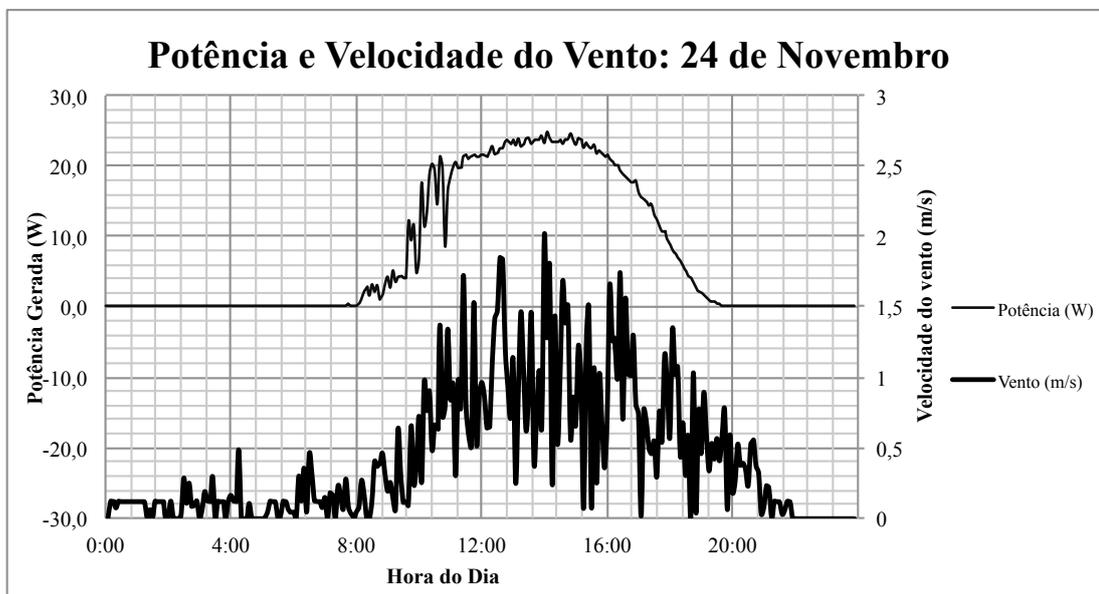


FIGURA 4.34: Potência gerada pelo painel fotovoltaico Siemens ProCharger 4JF e velocidade do vento ao longo do dia 24 de novembro.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho apresenta os conceitos de sistema de geração fotovoltaica, bem como os fatores que influenciam a potência gerada. Para a implementação de qualquer sistema que busque maximizar a potência drenada de um PV faz-se necessário o monitoramento deste. Por isto é desenvolvida uma plataforma de aquisição de dados e monitoramento de um painel fotovoltaico através do ambiente virtual de instrumentação **LabVIEW**[®].

Para o monitoramento são construídos e aferidos sensores de temperatura, tensão, corrente e velocidade do vento, bem como suas interfaces de condicionamento de sinal.

Os sensores de temperatura utilizam o circuito integrado LM35DZ e um circuito amplificador de ganho aproximadamente 5,7. O conjunto sensor-amplificador é ensaiado para situações de aquecimento e resfriamento entre 10 e 94°C, nos quais o processo de aferição resulta em um fator R^2 0,9922 para o sensor 1 e 0,9957 para o sensor 2.

O sensor de tensão projetado é um divisor resistivo que faz a adequação do nível de tensão do módulo fotovoltaico para a leitura pela placa de aquisição de dados. A fim de verificar e garantir a linearidade da tensão de saída do circuito, faz-se ensaio variando a tensão de entrada do circuito e verificando a tensão de saída, no que resulta em um R^2 aproximadamente 1.

Um circuito integrado sensor de corrente baseado no efeito hall, conectado à uma interface de remoção da componente DC e filtragem ativa, é utilizado para a medição de corrente. Este sensor possui uma saída em tensão linearmente proporcional a corrente de entrada. O circuito de condicionamento de sinal junto com o sensor de corrente é ensaiado variando a corrente de entrada de 0 a 5A, no que resulta em um fator R^2 0,9989.

A construção do anemômetro de conchas, utiliza um sensor óptico no qual um disco contendo 60 cavidades atravessa-o gerando interrupções do feixe de luz a fim de calcular a frequência de rotação. Apesar de árdua confecção mecânica e carência de métodos mais robustos de aferimento, este apresentou um fator R^2 igual a 0,8021 e sua reta interpolada difere 5% da reta ideal de velocidade angular.

Os sensores, através de suas interfaces de condicionamento de sinal são conectadas a um placa de aquisição de dados USB NI-6251 para a comunicação com o software

LabVIEW[®].

O sistema monitora um PV Siemens ProCharger 4JF em um ângulo de fixação de 30° conectado a uma carga resistiva de 4Ω durante o intervalo dos dias 11 a 14 e 18 a 24 de novembro. As variáveis observadas são tensão, corrente e temperatura do painel, temperatura ambiente e velocidade do vento.

A partir de índices obtidos na literatura e em registros de estações meteorológicas calcula-se a energia gerada prevista para o dado intervalo de tempo. Com os dados obtidos através do protótipo desenvolvido, comparada-se a energia total gerada com a prevista.

Analisa-se o comportamento da potência gerada e a temperatura do módulo fotovoltaico, na qual comprova-se o aumento da temperatura em função de maior circulação de corrente, bem como a queda da temperatura do painel fotovoltaico quando há maior incidência de vento. Fundamenta-se, baseado nos gráficos de potência e temperatura, a influência negativa do aumento de temperatura do módulo fotovoltaico em relação a potência gerada.

Devido ao curto tempo de monitoramento da velocidade do vento e a limitação do equipamento não é possível afirmar, justificado por dados práticos obtidos através do protótipo desenvolvido, alguma influência direta na potência gerada pelo painel fotovoltaico, porém observa-se a equivalência dos picos de incidência de vento com uma queda na temperatura do PV.

A maior limitação deste trabalho é a precisão anemômetro, pois a confecção mecânica por ser a etapa mais árdua, após construídos 3 protótipos que apresentaram alto atrito e perdas mecânicas optou-se por fazer a usinagem da peça em um torno mecânico. A construção de um túnel de vento para o ensaio e aferição deste em uma larga faixa de velocidade de vento não turbulento poderá resultar em medidas mais precisas.

Este trabalho vem a suprir o levantamento de dados de geração fotovoltaica e está disponível para futuros projetos e análises no CEEMA.

Para trabalhos futuros é a implementação de um conversor buck com MPPT para a carga de um banco de baterias e um conversor boost para a implementação de um inversor de tensão. Será feita a construção de um túnel de vento para a melhor aferimento do anemômetro.

O anemômetro possibilita o estudo do potencial eólico local para a integração de fontes de energia, trabalho o qual já encontra-se em andamento pelo CEEMA.

Referências

- ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC. *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. [S.l.].
- ALMEIDA, W. R. M. *Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação*. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO, 2004.
- ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica - Banco de Informações de Geração*. Out. 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 06 out. 2011.
- ATLAS-SOLARIMÉTRICO. [S.l.]: Universitária da UFPE, 2000.
- BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. 6. ed. [S.l.]: LTC Editora, 1999.
- BRITO, M. A. G. de et al. Main maximum power point tracking strategies intended for photovoltaics. In: *COBEP*. [S.l.: s.n.], 2011.
- CASTRO, R. M. *Introdução à Energia Fotovoltaica*. Nov. 2002.
- CEPEL. *Energia Solar Princípios e Aplicações*. [S.l.], 2006.
- COMMISSION, E. *Photovovoltaic Solar Energy - Development and current Research*. 2009.
- EFEITO Hall. 2011. Wikipédia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Hall>. Acesso em: 07 dez. 2011.
- ENERGY, E. E. . R. *2008 SOLAR TECHNOLOGIES MARKET REPORT*. [S.l.], Jan. 2010.
- FARRET, F. A.; SIMÕES, M. G. *Integration of Alternative Sources of Energy*. [S.l.]: Somerset, NJ: Wiley-IEE Press, 2006.
- FBDS. *Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável*. 2011. Disponível em: <http://www.fbds.org.br/fbds/rubrique.php3?id_rubrique=1>. Acesso em: 21 out. 2011.
- IEA. *Guidelines for Monitoring Stand-Alone Photovoltaic Power Systems Guidelines for Monitoring Stand-Alone Photovoltaic Power Systems: Methodology and Equipment*. [S.l.], 2003.
- INMET - Monitoramento das Estações Automáticas. 2011. Meteorologia do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/pg_automaticas.php>. Acesso em: 23 nov. 2011.

- LIMA, L. P. de. *Integração de Pilhas de Células a Combustível com Outras Fontes Alternativas de Energia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Santa Maria, 2009.
- MASTERS, G. M. *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. [S.l.]: John Wiley Sons, Inc., 2004.
- MESSENGER, R. A.; VENTRE, J. *Photovoltaic Systems Engineering*. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- MME. Matriz energética nacional 2030. In: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO. [S.l.], Nov. 2007.
- NASA. *NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data*. 2011. Disponível em: <<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>>. Acesso em: 06 dez. 2011.
- NATIONAL SEMICONDUCTOR. *LM35 - Precision Centigrade Temperature Sensors*. [S.l.], 2000.
- NI. *What is NI LabVIEW?* 2011. National Instrument. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/whatis/>>. Acesso em: 23 out. 2011.
- NREL-National Renewable Laboratory. *PV FAQs* -. 2004. U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
- NREL-National Renewable Laboratory. *Monitoring System Performance*. [S.l.], 2011.
- POULEK, V.; LIBRA, M. New bifacial solar trackers and tracking concentrators. *Solar Trackers*.
- PSIM. *Solar Module*. [S.l.], 2010.
- PVEDUCATION.ORG. 2010.
- R2. 2012. Wikipédia. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/R2>>.
- RESOURCES, P. V. *Photovoltaic Trackers*. 2011. Disponível em: <<http://www.pvresources.com/PVSystems/Trackers.aspx>>. Acesso em: 06 out. 2011.
- SANGANI, C.; SOLANKI, C. Experimental evaluation of v-trough (2 suns) pv concentrator system using commercial pv modules. *ScienceDirect*, 2006.
- SIEMENS. *Installation Guide for the Siemens Solar ProCharger® JF Solar Modules*. [S.l.].
- TAMIZHMANI, G. et al. Photovoltaic module thermal/wind performance: Long -term monitoring and model development for energy rating. *NCPV and Solar Program Review Meeting - NREL*, 2003.

Anexos

Anexo A: Dados Obtidos na Calibração dos Sensores de Temperatura

TABELA 11: Tabela apresentando os dados do ensaio de calibração do sensor 1 para o aquecimento de 10 a 94°C.

Termometro (°C)	Aquecimento			
	Medida 1 (V)	Medida 2 (V)	Média (V)	Varição (%)
10	0,45	0,55	0,50	22,788
15	0,81	0,78	0,79	-3,576
20	1,05	0,99	1,02	-5,614
25	1,32	1,29	1,31	-2,113
30	1,61	1,55	1,58	-3,724
35	1,87	1,85	1,86	-1,119
40	2,11	2,13	2,12	0,899
45	2,20	2,27	2,23	2,808
50	2,43	2,54	2,48	4,525
55	2,71	2,80	2,75	3,168
60	2,96	3,09	3,03	4,625
65	3,23	3,36	3,29	4,149
70	3,50	3,58	3,54	2,198
75	3,75	3,91	3,83	4,313
80	4,00	4,19	4,09	4,750
85	4,25	4,47	4,36	5,176
90	4,47	4,71	4,59	5,369
94	4,87	4,99	4,93	2,464

TABELA 12: Tabela apresentando os dados do ensaio de calibração do sensor 1 para o resfriamento de 94 a 10°C.

Termometro (°C)	Resfriamento			
	Medida 1 (V)	Medida 2 (V)	Média (V)	Varição (%)
10	0,63	0,56	0,60	-10,709
15	0,85	0,79	0,82	-6,440
20	1,09	1,01	1,05	-7,916
25	1,26	1,35	1,31	7,098
30	1,48	1,67	1,57	12,584
35	1,71	1,90	1,80	11,105
40	1,99	2,23	2,11	11,886
45	2,31	2,47	2,39	6,695
50	2,78	2,70	2,74	-2,626
55	3,04	3,03	3,04	-0,590
60	3,34	3,33	3,33	-0,299
65	3,61	3,62	3,61	0,277
70	3,89	3,88	3,88	-0,257
75	4,12	4,13	4,12	0,243
80	4,38	4,38	4,38	0,000
85	4,58	4,63	4,60	1,092
90	4,79	4,84	4,81	1,044
94	4,87	4,99	4,93	2,464

TABELA 13: Dados do ensaio de calibração do sensor 2 para o aquecimento de 10 a 94°C.

Termometro (°C)	Aquecimento			
	Medida 1 (V)	Medida 2 (V)	Média (V)	Varição (%)
10	0,57	0,58	0,57	1,754
15	0,83	0,82	0,69	-1,205
20	1,04	1,05	0,94	0,962
25	1,31	1,34	1,19	2,290
30	1,60	1,60	1,45	0,000
35	1,86	1,91	1,75	2,688
40	2,12	2,22	2,04	4,717
45	2,37	2,54	2,33	7,173
50	2,62	2,86	2,61	9,160
55	2,93	3,18	2,90	8,532
60	3,25	3,52	3,22	8,308
65	3,57	3,84	3,54	7,563
70	3,90	4,16	3,86	6,667
75	4,18	4,46	4,18	6,699
80	4,47	4,74	4,46	6,040
85	4,72	5,02	4,74	6,356
90	4,99	5,33	5,02	6,814
94	5,56	5,57	5,28	0,180

TABELA 14: Tabela apresentando os dados do ensaio de calibração do sensor 2 para o resfriamento de 94 a 10°C.

Termometro (°C)	Resfriamento			
	Medida 1 (V)	Medida 2 (V)	Média (V)	Varição (%)
10	0,65	0,59	0,62	-9,231
15	0,89	0,83	0,86	-6,742
20	1,16	1,06	1,11	-8,621
25	1,33	1,42	1,37	6,767
30	1,56	1,73	1,64	10,897
35	1,83	2,03	1,93	10,929
40	2,13	2,30	2,21	7,981
45	2,42	2,56	2,49	5,785
50	2,84	2,80	2,82	-1,408
55	3,13	3,14	3,13	0,319
60	3,41	3,41	3,41	0,000
65	3,70	3,72	3,71	0,541
70	4,01	4,01	4,01	0,000
75	4,27	4,3	4,28	0,703
80	4,56	4,57	4,56	0,219
85	4,80	4,87	4,83	1,458
90	5,06	5,11	5,08	0,988
94	5,56	5,27	5,41	-5,216

Anexo B: Dados Obtidos na Calibração do Sensor de Tensão

TABELA 15: Valores de tensão de entrada e saída obtidos no ensaio do sensor de tensão.

V_{in} (V)	V_{out} (mV)
0	0,0
2	48,0
4	96,0
6	144,5
8	192,0
10	239,9
12	288,0
14	330,9
16	381,9
18	431,8
20	480,5

Anexo C: Dados Obtidos na Calibração do Sensor de Corrente

TABELA 16: Valores de tensão de saída do circuito sensor de corrente obtidos no ensaio variando-se a corrente de entrada.

I (A)	V_{sensor}(V)
0	0,0017
4,6	2,4000
2,37	1,2340
1,57	0,8350
1,19	0,6330

Anexo D: Dados Obtidos na Calibração do Anemômetro

TABELA 17: Valores de frequência da onda quadrada de saída do sensor óptico e velocidade do vento no ensaio de calibração do anemômetro.

Velocidade do vento Medida com o Anemômetro Minipa MDA-10(m/s)	Frequência da Onda Quadrada do Sensor Óptico (Hz)	Velocidade Pre- vista (m/s)
1,6	47,62	1,30
1,4	41,15	1,12
1,0	39,84	1,08
1,2	39,37	1,07
1,5	50,00	1,36
1,3	51,02	1,39
0,8	31,20	0,85
0,6	28,00	0,76
0,9	35,84	0,98
1,2	37,24	1,01
1,1	42,28	1,15
2,1	71,43	1,94
1,7	66,45	1,81
1,5	54,47	1,48
1,8	58,65	1,60
1,7	57,47	1,56
1,2	35,34	0,96
1,1	36,30	0,99
0,7	35,27	0,96
1,4	36,10	0,98