



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

GUILHERME MUCCILLO DEXHEIMER

**SISTEMA DE MEDIÇÃO, CONTROLE E ACIONAMENTO
PARA SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR
FOTOTÉRMICO COM CIRCULAÇÃO FORÇADA**

Lajeado
2010

GUILHERME MUCCILLO DEXHEIMER

**SISTEMA DE MEDIÇÃO, CONTROLE E ACIONAMENTO
PARA SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR
FOTOTÉRMICO COM CIRCULAÇÃO FORÇADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas do Centro Universitário
UNIVATES, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Controle e Automação.
Área de concentração:
Instrumentação/controle

ORIENTADOR: Rodrigo Wolff Porto

Lajeado
2010

GUILHERME MUCCILLO DEXHEIMER

SISTEMA DE MEDIÇÃO, CONTROLE E ACIONAMENTO PARA SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR FOTOTÉRMICO COM CIRCULAÇÃO FORÇADA

Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação do CETEC e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Rodrigo Wolff Porto, UNIVATES

Mestre pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Odorico Konrad, UNIVATES

Doutor pela MONTANUNIVERSITAT LEOBEN – Leoben, Áustria

Prof. Rodrigo Wolff Porto, UNIVATES

Mestre pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. Ronaldo Husemann, UNIVATES

Mestre pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Coord. do Curso de Eng. de Controle e Automação: _____

Prof. Rodrigo Wolff Porto

Lajeado, novembro de 2010.

Dedico este trabalho a todos que sempre apostaram em mim, me apoiando e me incentivando. Aos meus avós, pais, amigos e namorada.



AGRADECIMENTOS

Agradeço à oportunidade de realizar este trabalho junto à planta do laboratório solar do Centro Universitário UNIVATES, em nome do prof. Dr. Odorico Konrad, que muito incentiva os alunos a voltarem seus pensamentos para as questões ambientais.

Agradeço também à minha família que me proporcionou a possibilidade de cursar graduação; à minha namorada Ângela que me ajudou sempre que precise ou não; e aos meus amigos que conviveram comigo durante a graduação.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema capaz de gerir medições de temperatura, luminosidade, vazão e que tem o objetivo de aumentar rendimento de um sistema de aquecimento solar com circulação forçada. Na busca pelo melhor rendimento foram implementadas duas funções para o acionamento da bomba de circulação forçada da água, que foi executada através de um inversor de frequência monofásico. Estes acionamentos ocorreram de forma proporcional à luminosidade, um de forma contínua, ou seja, variando a vazão durante todo o dia. Já a outra forma, foi descontínua, onde o acionamento da bomba dependia também das temperaturas do sistema. Estas aplicações atingiram rendimentos de até três vezes o rendimento do sistema inicial do laboratório solar o que proporcionou um incremento de aproximadamente 15°C à temperatura de consumo.

Palavras-chave: aquecimento solar, medição de temperatura, medição de luz, vazão.

ABSTRACT

This work presents the development of a system capable to manage temperature, light and flow measurements and it has the objective to get a better income from a system of sun heating with water forced circulation. To rich the goal of improving the system yield it was implemented two functions to drive the water forced pump, witch one was executed by an 1-phase frequency inverter. This drives where proportional to the light, one continuous, varying the flow during the hole day. The other one discontinuous, witch one also depends of the system temperatures. This applications get yield levels until three times the initial yield from the system and proportioning an incrementing almost 15°C on the consumption temperature.

Keywords: solar heating, temperature measurement, light measurement, flow.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Fluxograma das aplicações práticas de energia solar (PEREIRA <i>et al.</i> , 2003) | 16 |
| Figura 2 Radiação solar direta (SWERA, 2005) | 18 |
| Figura 3 Usina heliotérmica de Abengoa na Espanha (LAMONICA, 2010) | 21 |
| Figura 4 Funcionamento do <i>Heat Pipe</i> (GOERCK, 2008) | 22 |
| Figura 5 Trocador de calor do <i>heat pipe</i> (DIY TRADE, 2008) | 22 |
| Figura 6 Performances de várias bitolas de encanamentos de cobre para <i>heat pipe</i> a água (ENERTRON, 2001) | 23 |
| Figura 7 Coletores solares com tubo a vácuo | 24 |
| Figura 8 Reservatório térmico Transsen (TRANSEN, 2006) | 25 |
| Figura 9 Superfícies isotermas em níveis para os tempos t=1h (a) e t=10h (b) de resfriamento (SAVICKI, 2007) | 26 |
| Figura 10 Partes constituintes do sistema de aquecimento do laboratório solar da Univates (adaptado de GOERCK, 2008) | 28 |
| Figura 11 Controlador Lógico para Aquecimento Solar, Classol (CLASSOL, 2008) | 29 |
| Figura 12 Medidor de Vazão RFO Gems Sensors (GEMS SENSORS, 2006) | 29 |
| Figura 13 Localização dos sensores PT100 da temperatura da água de consumo (a) e temperaturas de entrada e saída dos coletores (b) | 30 |
| Figura 14 Gráficos de temperaturas e vazão (adaptado de GOERCK, 2008) | 31 |
| Figura 15 Reservatórios de 100 L (não térmicos) e reservatório térmico de 200 L | 32 |
| Figura 16 Temporizadores da válvula solenóide e da bomba de reabastecimento | 33 |
| Figura 17 Gráfico com sensor PT100 e placa de condicionamento de sinal de vazão danificados | 34 |
| Figura 18 Display de interface | 36 |
| Figura 19 Esquema de ligação do LM2907N (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2003) | 39 |
| Figura 20 Saída do medidor de vazão | 40 |
| Figura 21 Divisor de tensão e filtro | 41 |
| Figura 22 Esquemático da placa de condicionamento de sinal de vazão | 42 |
| Figura 23 Placa de condicionamento de sinal de vazão | 42 |
| Figura 24 Esquema de ligação e diagrama interno do OPT101 (BURR-BROWN, 1994) | 43 |
| Figura 25 Resposta espectral do OPT101 (adaptado de BURR-BROWN, 1994) | 44 |
| Figura 26 Esquemático da placa de medição de luminosidade | 45 |
| Figura 27 Sensor PT100 | 46 |
| Figura 28 Compensação a três fios (BOLTON, 2004) | 47 |
| Figura 29 Esquema de ligação do INA114 (BURR-BROWN, 1992) | 48 |
| Figura 30 Circuito de condicionamento do sinal do PT100 | 49 |
| Figura 31 Fontes de alimentação para o circuito de condicionamento de sinal dos PT100 | 50 |
| Figura 32 Placa do circuito de condicionamento de sinal dos PT100 | 50 |
| Figura 33 Comunicação SPI (TERROSO, 2004) | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 34 Pinos da memória 25AA512 (MICROCHIP, 2007)..... | 53 |
| Figura 35 Fluxograma do programa da placa de geração e controle do PWM | 54 |
| Figura 36 Esquemático da placa de aquisição e controle | 55 |
| Figura 37 Placa de aquisição e controle | 56 |
| Figura 38 Diagrama interno do MOC3022 (MOTOROLA, 1995)..... | 57 |
| Figura 39 Esquemático do comando de acionamento da bomba de reabastecimento e da válvula solenóide..... | 58 |
| Figura 40 Fluxograma do programa da placa de geração e controle do PWM | 60 |
| Figura 41 Esquemático da placa de geração e controle do PWM..... | 61 |
| Figura 42 Placa de controle do PWM..... | 61 |
| Figura 43 Esquemático do <i>drive</i> do inversor | 62 |
| Figura 44 Placa do <i>drive</i> do inversor..... | 62 |
| Figura 45 Esquemático da placa de potência do inversor | 64 |
| Figura 46 Placa de potência do inversor | 64 |
| Figura 47 Esquemático da placa retificadora de potência (TIGGEMANN, 2008) | 65 |
| Figura 48 Placa da fonte CC do inversor | 65 |
| Figura 49 Gráfico temperatura de consumo do sistema inicial do laboratório solar .. | 67 |
| Figura 50 Gráfico temperatura de consumo do sistema quando a bomba tem controle por picos | 67 |
| Figura 51 Gráfico temperatura de consumo do sistema quando a bomba tem controle proporcional direto..... | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 Testes de vazão | 38 |
| Tabela 2 Dados de luminosidade do OPT101 de forma indireta..... | 45 |



LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|---------|---|
| ABB: | ASEA Brown Boveri |
| AISI: | American Iron and Steel Institute |
| CA: | Corrente Alternada |
| CI: | Circuito Integrado |
| CC: | Corrente Contínua |
| CV: | Cavalo-Vapor |
| EEPROM: | electrically-erasable programmable read-only memory |
| IP: | Índice de Proteção |
| LED: | Light Emissor Diode |
| MOSI: | Master Output Slave Input |
| MISO: | Master Input Slave Output |
| NBR: | Norma Brasileira |
| PWM: | Pulse-Width Modulation |
| PCI: | Placa de Circuito Impresso |
| SI: | Serial Input |
| SO: | Serial Output |
| SCK: | Serial Clock |
| SPI: | Serial Peripheral Interface |
| SRAM: | Static Random Access Memory |
| RTD: | Resistance Temperature Detector |
| SWERA: | Solar and Wind Energy Resource Assessment |
| USB: | Universal Serial Bus |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 | ENERGIA SOLAR..... | 16 |
| 2.1 | Leis e normas brasileira..... | 19 |
| 2.2 | Coletores solares..... | 20 |
| 2.3 | Reservatórios térmicos | 25 |
| 3 | SITUAÇÃO INICIAL | 27 |
| 4 | PROPOSTA | 35 |
| 4.1 | Interface..... | 36 |
| 4.2 | Cálculo do rendimento energético | 37 |
| 4.3 | Medição de vazão | 38 |
| 4.4 | Medição de luminosidade | 43 |
| 4.5 | Medição de temperatura..... | 45 |
| 4.6 | Placa de controle e aquisição das medidas..... | 51 |
| 4.7 | Atuações..... | 56 |
| 4.7.1 | Acionamento da válvula solenóide e da bomba de reabastecimento | 57 |
| 4.7.2 | Acionamento da bomba de circulação forçada | 58 |
| 5 | RESULTADOS..... | 66 |
| 6 | CONCLUSÃO | 69 |

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica está presente em grande parte do que é utilizado no mundo, e a cada dia que passa, se necessita de mais energia em suas mais variadas formas de obtenção. A energia elétrica é utilizada na alimentação, comunicação, entretenimento entre outros. Com o frequente aumento da demanda, a busca por fontes alternativas e renováveis é uma área em crescente expansão. (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

No Brasil são três as principais fontes de energia elétrica e seus impactos ambientais são os mais variados. As usinas hidrelétricas necessitam de uma área inundada muito grande para seu reservatório; usinas nucleares têm como resíduo não somente a água quente, mas também subprodutos radioativos; e as termelétricas que utilizam algum tipo de combustível fóssil para produzirem calor, colaboram desta forma para o aquecimento global através do efeito estufa e da chuva ácida (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

Como alternativa que minimize os impactos ambientais, existe a energia solar, que predominantemente é utilizada no aquecimento de água, se, por exemplo, for utilizada para substituir uma usina de gás natural, contribui reduzindo aproximadamente 4,5 toneladas de CO₂, que seriam lançadas ao ar pelo sistema de gás natural. Isto faz com que muitos governos subsidiem painéis solares ao usuário final. Seguindo esta política, em 2006 a China já possuía 65,4% da capacidade mundial instalada de produção de energia solar, totalizando 104 GWh (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

Assim, a energia solar se destaca por sua disponibilidade, acessibilidade e passividade de exploração (GOERCK, 2008). Há alguns anos na busca por atrair investimentos privados, criou-se o projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), que disponibiliza informações sobre recursos solares e eólicos em diversas partes do mundo (GOERCK, 2008).

Em 2002, o Brasil possuía uma estrutura de coletores solares instalada de 1,2 m²/100 habitantes, o que é muito pequeno quando comparado a países que possuem um maior desenvolvimento nesta área como Israel (67,1 m²/100 habitantes), Áustria (17,5 m²/100 habitantes) e China, que possui uma população quase 6,9 vezes maior do que o Brasil tem 3,2 m²/100 habitantes (PEREIRA *et al.* 2006).

O Brasil, que em 2006 contava com 2,18% da capacidade mundial instalada de produção de energia solar (GOLDEMBERG; LUCON, 2008), destacou-se no projeto SWERA por possuir um enorme potencial energético pouco aproveitado, já que recebe aproximadamente 2.200 horas de incidência solar direta por ano, o que corresponde a 15 trilhões de MWh, número equivalente a 50 mil vezes o consumo nacional (GOERCK, 2008).

De acordo com Fraidenaich (2004), no Brasil o mercado de coletores solares vem em uma fase muito promissora, porém ainda muito restrito às regiões sul, sudeste e centro-oeste. Este mercado já contribui com 10% do consumo residencial de energia térmica, ou seja, já substituiu nestas regiões 10% dos chuveiros, torneiras e aquecedores.

Os coletores mais comumente utilizados no Brasil são os planos, abertos ou fechados, dependendo da temperatura desejada e da finalidade da água a ser aquecida. Pode-se ver que há um grande potencial para expansão no país. Os principais desenvolvimentos deverão ocorrer na redução de custos de manufatura, na qualidade da automação e dos materiais empregados (JANNUZZI, 2003).

Desde a década de 70, os materiais evoluíram muito, bem como os equipamentos utilizados para monitorar e fazer a circulação forçada da água. Porém, estes equipamentos muitas vezes estão implementados de forma inadequada, ocasionando assim um aproveitamento de energia (HARLAN, 2000).

O sistema mais encontrado para controle de aquecimento de água com circulação forçada diferença de temperaturas, ou seja, uma bomba de circulação é acionada de acordo com as temperaturas de saída e entrada dos coletores. Isto faz com que a água aquecida que está nos coletores solares vá ao reservatório aumentando a temperatura deste. Este tipo de sistema é geralmente utilizado para aquecimento de piscinas, porém, pode ser encontrado também em aplicações de aquecimento de água para a substituição de chuveiros e torneiras elétricas (JUNIOR; CARNEIRO, 2008).

O chuveiro elétrico é utilizado em aproximadamente 97% das habitações brasileiras. Trata-se de um equipamento de baixo custo inicial, porém que consome 7% de toda eletricidade produzida no país, o dobro da demanda da iluminação pública (PEREIRA *et al.*, 2006). Além disso, chuveiro elétrico corresponde por aproximadamente 25% a 35% do consumo total de energia em uma residência, (PEREIRA *et al.*, 2003).

Desta forma, pretende-se ao fim deste trabalho apresentar e validar uma proposta de sistema que venha a gerir as medidas de temperatura, vazão, luminosidade, acionamento de bombas e de uma válvula. O projeto apresentado neste trabalho visa a fácil visualização e disponibilização das medidas adquiridas, bem como o aumento do rendimento de um sistema de aquecimento solar com circulação forçada.

Para que se possa verificar o funcionamento deste sistema, a planta solar ou laboratório solar do Centro Universitário UNIVATES servirá assim, como meio para validação do sistema proposto. Este laboratório foi implementado e elaborado na dissertação de mestrado de Goerck (2008).

O sistema proposto tem como objetivos prover medidas mais precisas e exatas através do correto condicionamento dos sinais, aprimorando desta forma o que Goerck (2008) apresentou. Estes condicionamentos auxiliarão o controle das partes elétricas que constituem o sistema do laboratório (bombas e válvula), fazendo com que desta forma se possa buscar um aumento no rendimento do sistema de aquecimento solar. A exibição dos dados ao usuário também é uma meta deste trabalho, para isso uma interface com display e botões possibilitará a interação entre o usuário e o sistema. Os dados poderão também ser enviados para um computador através de uma comunicação serial.

No segundo capítulo será apresentada uma introdução sobre a energia solar, situando sobre a realidade brasileira neste setor. Também será apresentado o funcionamento de um coletor solar de tubo à vácuo e o conceito de um *heat pipe*. Será elucidado também sobre reservatórios térmicos mostrando seu funcionamento e importância para o rendimento do sistema térmico. O princípio de medição de vazão utilizado no laboratório solar e seu funcionamento serão apresentados no Capítulo 3. Já no Capítulo 4, será apresentado o sistema implementado por Goerck (2008) juntamente com o funcionamento deste e suas partes constituintes. No Capítulo 5 será apresentada a proposta deste trabalho e todas as suas funcionalidades, as metodologias utilizadas nas medições de vazão luminosidade e temperatura. Este capítulo também apresentará a placa de aquisição e controle, bem como as placas utilizadas na elaboração dos acionamentos do sistema. O Capítulo 6 é destinado aos resultados obtidos durante a aplicação do sistema proposto juntamente com uma comparação deste para com o sistema implementado por Goerck (2008). A conclusão será apresentada no Capítulo 7.

2 ENERGIA SOLAR

Desde o início do século XX tem-se procurado estimar a taxa de energia por área emitida pelo Sol. Este valor, chamado de constante solar e que se imagina fixo, já se teve muitos resultados diferentes, porém relativamente próximos uns dos outros. Seu valor estimado no limite superior da atmosfera é de $1367,5 \text{ W/m}^2$ (DUFFIE; BECKMANN, 1980).

A energia solar é utilizada há muito tempo para o aquecimento de água. Porém, outras aplicações vêm aparecendo cada vez mais fortes em feiras tais como fogões e ar condicionados (GOLDENBERG; LUCON, 2008).

O Sol nos fornece uma energia limpa e renovável, uma vez que a Terra recebe aproximadamente 180.000 TW de energia solar por dia, mais de 20.000 vezes o que é gasto por dia em todo o planeta (MOURÃO, 2002).

Pode-se destacar também como vantagem o fato de não influir no efeito estufa, não ser poluente e não necessitar de turbinas ou geradores para a produção de energia térmica ou elétrica (MOURÃO, 2002).

No fluxograma apresentado na Figura 1, estão descritas algumas das aplicações práticas nas quais a energia solar pode se apresentar (PEREIRA *et al.*, 2003). As aplicações podem ser passivas, onde a edificação é projetada para a melhor utilização da luz solar, ou ativas, onde a energia recebida é convertida, ou em sistemas térmicos, quando a energia solar aquece algo ou em sistemas fotovoltaicos, quando convertem a luminosidade em energia elétrica.

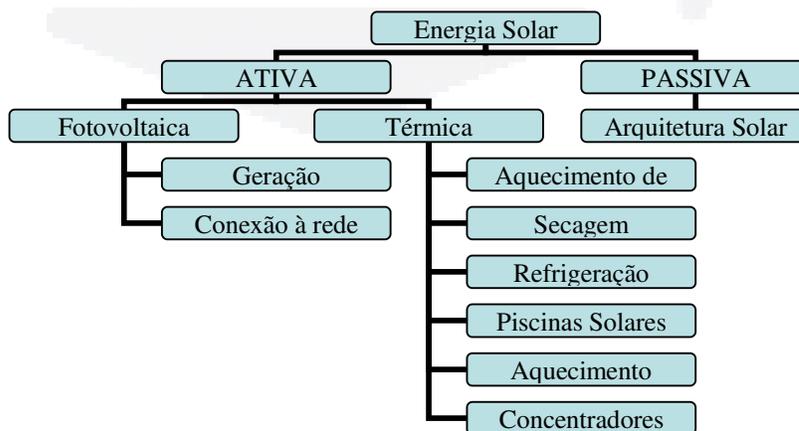


Figura 1 Fluxograma das aplicações práticas de energia solar (PEREIRA *et al.*, 2003)

A energia solar fotovoltaica pode ser utilizada de forma a proporcionar uma geração descentralizada, que ocorre quando a energia solar convertida em tensão é armazenada em baterias diretamente no local consumidor, para posterior utilização quando necessária. Este tipo de geração pode ser integrado à rede de distribuição. Desta forma, quando o armazenamento estiver completo, com baterias em carga máxima, o excedente coletado pode ser vendido à distribuidora (PEREIRA *et al.*, 2003).

Quando a energia solar é utilizada na forma de calor, ou seja, térmica, seu uso mais comum é para o aquecimento de água em substituição de chuveiros elétricos ou de aquecedores de piscinas. Desde o início da década de 1990, se intensificaram as pesquisas sobre a utilização de energia solar para a refrigeração, atualmente em qualquer sistema de refrigeração por sorção, são utilizados coletores solares fototérmicos (PEREIRA *et al.*, 2003).

É muito comum encontrar em sistemas térmicos com coletores solares planos um trocador de calor. Nestas soluções, utiliza-se um fluido térmico diferente da água, normalmente glycol, que protege o sistema de um possível congelamento. O sistema circula o fluido térmico somente quando a temperatura na saída do coletor solar for maior que a temperatura da água no reservatório térmico, quando os coletores são expostos a temperaturas negativas pode ocorrer congelamento. Para suprir a necessidade de água quente em períodos com menos insolação é também comum se encontrar um aquecedor auxiliar a gás ou elétrico (DUFFIE; BECKMANN, 1991).

O projeto SWERA, disponibiliza mapas com informações sobre a radiação solar e tem como parceiros entidades como Nasa e o Laboratório de energia solar do Brasil. Na Figura 2, pode-se perceber que no estado do Rio Grande do Sul, há um bom potencial de radiação solar, chegando a níveis de entre 5,5 e 6,5 kWh/m² por dia.

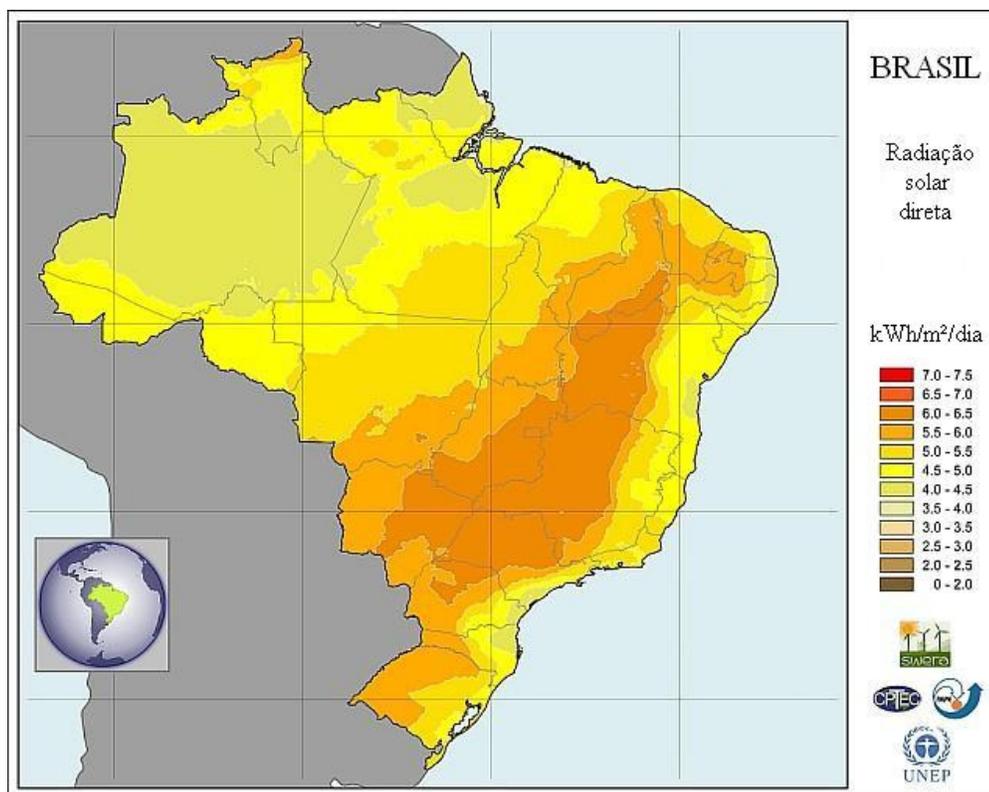


Figura 2 Radiação solar direta (SWERA, 2005)

As duas formas mais conhecidas de utilização da energia solar são: a fotovoltaica e a fototérmica. A energia fotovoltaica baseia-se na conversão direta da energia solar em eletricidade através de células solares, que consistem em duas camadas de material semicondutor positivo e negativo. A corrente elétrica é gerada quando a luz incide sobre a camada negativa e alguns fótons são absorvidos liberando elétrons. Essa corrente percorre um circuito que se fecha através da camada semicondutora positiva (OLIVEIRA; DAL PAI, 2010).

Já a conversão fototérmica é a transformação da radiação solar em calor através de coletores solares, que captam e convertem a energia solar em energia térmica. Além disto, o sistema é integrado a um reservatório térmico isolado para armazenamento do fluido térmico aquecido (OLIVEIRA; DAL PAI, 2010).

A utilização dessa forma de energia implica em saber captá-la e armazená-la, já que esta pode ser aplicada tanto em áreas residenciais, quanto comerciais, sendo a redução do consumo de energia elétrica um dos principais aspectos motivadores na escolha pela sua implantação (TIRADENTES, 2007).

2.1 Leis e normas brasileira

No Brasil, em algumas cidades já estão em vigor leis que obrigam certas edificações a possuírem sistema de aquecimento solar. Por exemplo, em São Paulo, a Lei 14.459 de julho de 2007, tornou obrigatório o uso de aquecedores solares para novas residências com mais de quatro banheiros e estabelecimentos comerciais que necessitam de água quente com frequência.

Segundo esta mesma lei, torna-se obrigatória também a instalação de aquecimento solar para piscinas independentemente de imóvel novo ou anterior à lei. Está descrito também que para locais com até três banheiros, deve-se deixar a infra-estrutura de encanamentos e afins para uma possível futura instalação de aquecimento solar.

Ainda consta nesta mesma lei quais edificações não necessitam da instalação de aquecimento solar por dificuldades técnicas, tais como sombreamento natural ou por alguma outra edificação, sendo que sempre é considerado o período de maior incidência solar sobre a área a serem implantados os coletores.

Existem também as normas técnicas de instalação de sistemas de aquecimento solar, dentre as quais se destacam:

- NBR 10184/1988 – Coletores solares planos para líquidos – determinação do rendimento térmico;
- NBR 10185/1988 – Reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar – Determinação de desempenho térmico;
- NBR 7198/1993 – Projeto e execução de instalações prediais de água quente;
- NBR 12269/1992 – Execução de instalações de sistemas de energia solar que utilizem coletores solares planos para aquecimento de água;
- NBR 15747-1:2009 – Sistemas solares térmicos e seus componentes – Coletores solares – Parte 1: Requisitos gerais e Parte 2: Métodos de ensaio;

Dentre estas normas, destaca-se o fato de a NBR 10185 ter sido revisada no ano de 2009, devido ao fato de ter-se observado uma evolução nos sistemas de aquecimento solar.

2.2 Coletores solares

Coletores solares são equipamentos responsáveis pela absorção e transferência da radiação solar para o fluido de trabalho (PEREIRA *et al.*, 2003).

A energia solar possui várias aplicações possíveis associadas ao uso final do fluido de trabalho e a tecnologia dos coletores solares em questão. Abrangem processos desde baixas temperaturas, com coletores solares planos para o aquecimento de água em substituição à chuveiros e torneiras elétricas, ou até mesmo altas temperaturas quando da geração heliotérmica (PEREIRA *et al.*, 2003).

Os coletores solares planos podem ser divididos em dois grupos: fechados e abertos. Os coletores fechados podem atingir temperaturas de até 60°C (PEREIRA *et al.*, 2003). São dispositivos que se utilizam do efeito estufa. Basicamente é composto por uma folha metálica negra, chamada de absorvedor, por cima na qual se instalam tubos onde circula a água. Para reduzir as perdas de calor, o absorvedor e os encanamentos são colocados em uma caixa isolada com uma cobertura de vidro quando se trata de coletores fechados (MOURÃO, 2002). Os coletores solares abertos atingem temperaturas de até 45°C. São tubos geralmente feitos de polipropileno e dispostos diretamente à luz. Estes tubos muitas vezes acabam sendo instalados nos telhados das casas onde recebem uma maior incidência de luz solar.

De acordo com Duffie e Beckmann (1991), coletores solares planos fechados podem atingir níveis de eficiência entre 65% e 70%, quando tiverem o auxílio de um refletor difuso e se utilizarem de coletores com dutos muito pequenos, fazendo com que se tenha menos líquidos por unidade de área.

Já os coletores solares fechados e que possuem placas e tubos de cobre conseguem atingir níveis de eficiência de até 75%, conforme experimentos realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sendo esta uma eficiência elevada. Isto se deve ao fato de o cobre possuir uma resposta termicamente mais rápida (PEREIRA *et al.*, 2006).

Nos concentradores ou focalizadores solares, a radiação solar é concentrada e depois absorvida em forma de energia térmica, a área do receptor é menor do que a do coletor (MOURÃO, 2002). Esta é uma das tecnologias mais difundidas de coletores, por serem competitivos com as tecnologias de produção de energia utilizadas mais comumente. Algumas usinas que utilizam espelhos parabólicos já estão em funcionamento na Califórnia com capacidade de 350 MW e a Espanha,

conforme mostrado na Figura 3, com duas unidades com capacidade de 100 MW cada (GOLDEMBER; LUCON, 2008).



Figura 3 Usina heliotérmica de Abengoa na Espanha (LAMONICA, 2010)

Outra ferramenta utilizada para converter a energia solar em energia térmica é o *heat pipe*, que foi inventado por volta da década de 40 por R. S. Gaugler, sendo publicada posteriormente por George Grover em 1964 (AIP, 1964).

A energia solar que incide sobre o tubo de vidro, faz o fluido térmico contido no *heat pipe*, que é facilmente evaporável, esquentar a ponto de vaporizá-lo. Quando este se torna vapor vai à parte superior do *heat pipe* onde troca calor, aquecendo a água, condensando e retornando ao fundo (GOERCK, 2008). Este processo pode ser observado na Figura 4.

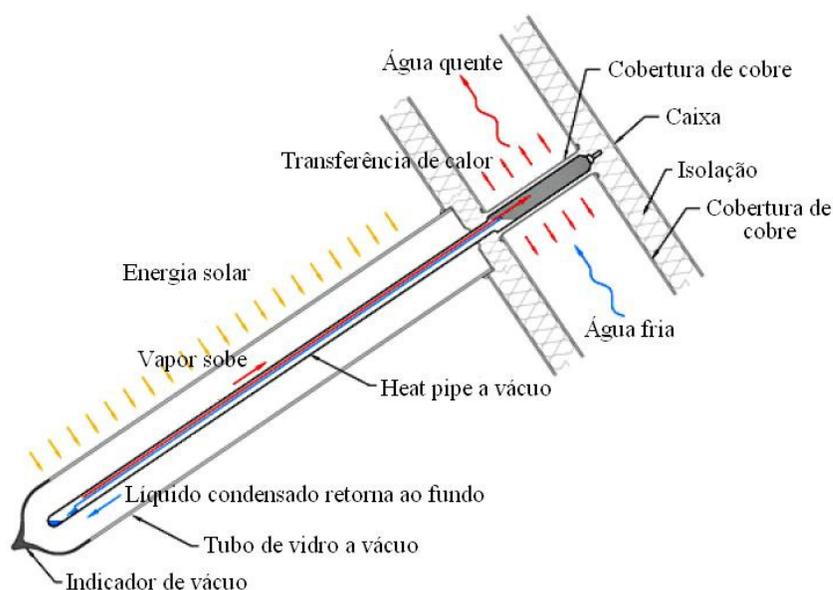


Figura 4 Funcionamento do *Heat Pipe* (GOERCK, 2008)

De acordo com Goerck (2008), a utilização do *heat pipe* apresentou uma eficiência de 40% nos períodos de menor incidência de luz solar e temperaturas mais baixas na cidade de Lajeado, Rio Grande do Sul, Brasil. A Figura 5 apresenta o trocador de calor do *heat pipe*, onde se pode observar também o isolante de fechamento do tubo bem como sua pintura interna escura de nitrato de alumínio.



Figura 5 Trocador de calor do *heat pipe* (DIY TRADE, 2008)

Outros sistemas de aquecimento solar podem ter um bom rendimento, porém a temperatura do líquido térmico depende da insolação, da quantidade de água a ser aquecida e naturalmente, das condições meteorológicas (MOURÃO, 2002).

Para a conversão da luz solar em energia térmica de forma otimizada deve-se levar em consideração alguns pontos durante a escolha do *heat pipe* que será utilizado (ENERTRON, 2001), tais como:

- Fluido térmico compatível com material do encanamento;
- Condições de operação;
- Posição dos coletores;
- Comprimento, espessura e forma do *heat pipe*;

Dentre estas considerações, a espessura do cano é um dos principais dados. Quando do dimensionamento da capacidade de transporte de calor deve-se observar uma relação direta com a bitola do tudo utilizado na construção do *heat pipe*, como mostra a Figura 6. Tubos com diâmetros maiores conseguem transferir mais quantidade de calor para cada metro de comprimento de tubo, estes diâmetros apresentados são dados em mm (ENERTRON, 2001).

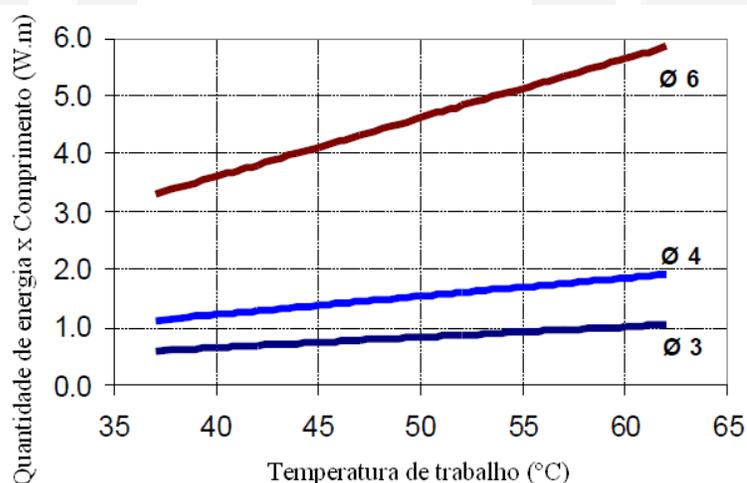


Figura 6 Performances de várias bitolas de encanamentos de cobre para *heat pipe* a água (ENERTRON, 2001)

A escolha do fluido térmico apropriado também é muito importante, visto que existem diversos tipos de fluido, cada um com uma faixa de temperatura de trabalho diferente (ENERTRON, 2001).

Através destes valores faz-se o dimensionamento do sistema em relação à necessidade, aplicabilidade e temperatura a qual se quer atingir. Este processo é

delicado e complicado, porém de grande importância para o sistema e seu funcionamento final (ENERTRON, 2001).

Coletores solares com tubo a vácuo, visam reduzir as perdas térmicas que ocorrem por condução. São compostos por tubos de vidro de borosilicato de parede dupla, além de a parede interna estar coberta de nitrato de alumínio. Este material tem excelente capacidade de absorção de calor (GOERCK, 2008).

O vidro de borosilicato é fabricado a partir de areia de quartzo, óxidos de boro, alumínio, potássio e sódio e também vidro reciclado, que possui um baixíssimo coeficiente de dilatação tornando assim resistente a choques térmicos, além de apresentar alta resistência química hidrolítica, ácida e cáustica.

Estes coletores, como os apresentados na Figura 7, funcionam como uma estufa que permite a entrada dos raios solares no tubo, que por sua vez são convertidos em energia térmica através de um *heat pipe* (MOURÃO, 2002).



Figura 7 Coletores solares com tubo a vácuo

Dentre as vantagens deste sistema destaca-se o isolamento a vácuo dos coletores, por assim permitir que não ocorra interferência da temperatura ambiente, possibilitando a captação contínua de energia mesmo com temperaturas negativas, sendo somente necessária existência de luz solar. Além disto, vento e chuva causam uma interferência mínima ao sistema (GOERCK, 2008).

2.3 Reservatórios térmicos

Os reservatórios são tanques utilizados para armazenar e manter aquecida a água proveniente dos coletores solares, de modo a atender à demanda diária, mesmo quando não há incidência solar (PEREIRA *et al.*, 2003).

São constituídos geralmente por um corpo de aço inoxidável ou cobre e devem ser termicamente isolados como pode ser observado na Figura 8, minimizando desta forma as perdas de calor para o ambiente (PEREIRA *et al.*, 2003).



Figura 8 Reservatório térmico Transsen (TRANSEN, 2006)

Os reservatórios térmicos em sua grande maioria prevêm um aquecimento auxiliar, que pode ser elétrico ou a gás, já que a incidência de radiação solar é intermitente (PEREIRA *et al.*, 2003).

A temperatura da água que está em um reservatório térmico se comporta como o demonstrado por Savicki (2007) na Figura 9. Pode ser observado que em um mesmo instante de tempo a temperatura se mantém estável ao longo do eixo Z, ou seja, na horizontal. Assim, a saída de água para o consumo é feito na parte mais alta do reservatório, onde a temperatura é sempre mais elevada (em vermelho na Figura 9 (a)). Já a reposição de água para o reservatório térmico ocorre na parte mais inferior deste, onde a temperatura é sempre menos elevada (em amarelo e verde na Figura 9 (a)) e o retorno dos coletores, água aquecida por estes, ocorre no meio em relação ao eixo X (vertical).

Pode-se observar também, que a Figura 9 (b) demonstra que o comportamento das temperaturas mesmo com o resfriamento, se mantém igual, com a água mais aquecida sempre na parte superior do reservatório.

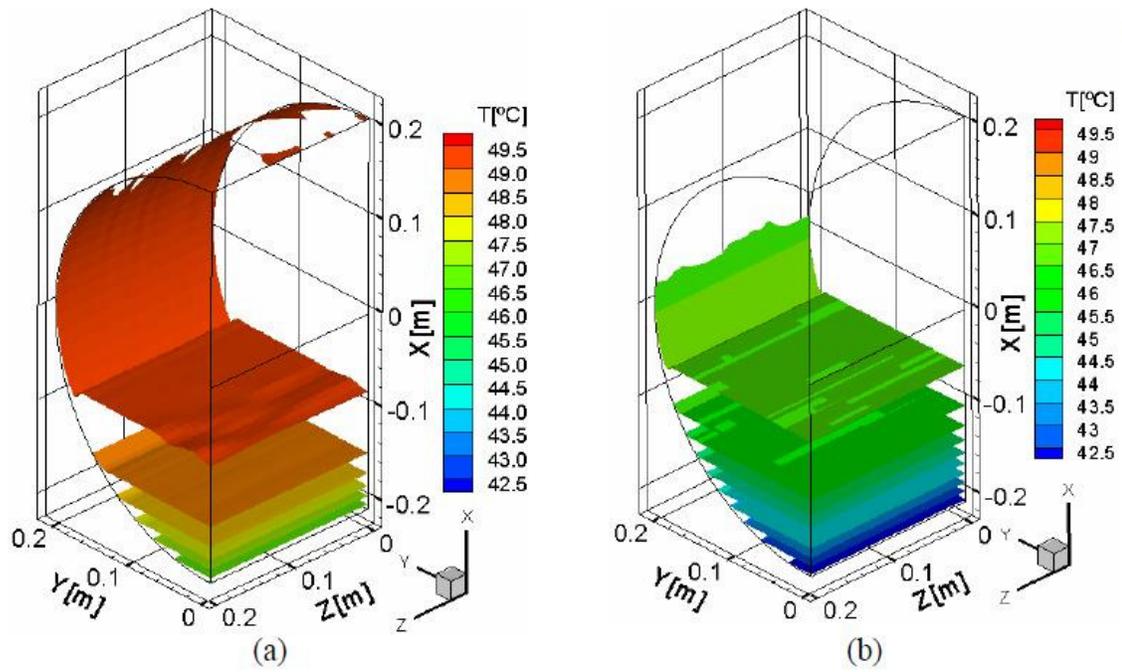


Figura 9 Superfícies isotermas em níveis para os tempos $t=1h$ (a) e $t=10h$ (b) de resfriamento (SAVICKI, 2007)

3 SITUAÇÃO INICIAL

O sistema de aquecimento do laboratório solar da Univates foi criado em 2008, como a dissertação de mestrado em ambiente e desenvolvimento de Goerck (2008). O sistema de controle da circulação da água implementado por ele é a situação inicial para o este sistema proposto.

Na Figura 10, pode-se observar as partes que compõem este sistema de aquecimento. É constituído de três reservatórios com a capacidade de 100 L, indicados pelo número 1 que são responsáveis por reabastecer o reservatório térmico (número 6), e desta forma, não permitindo que entre ar na tubulação. Os reservatórios de 100 L e o reservatório térmico que tem capacidade de 200 L estão interconectados juntamente com os coletores solares através de uma tubulação (número 3).

A água aquecida nos coletores solares se desloca para o reservatório térmico através da tubulação (número 7), com o auxílio de uma bomba de circulação (número 8).

A tubulação de número 5, permite que a água se desloque por gravidade até o reservatório de 250 L que está enterrado, que no sistema de Goerck (2008) tinha como função armazenar a água enquanto esta resfriava. Para retornar aos reservatórios de 100 L a água tem o auxílio da bomba indicada pelo número 10 através da tubulação de número 2.

O número 4 indica uma tubulação de segurança, para que o excedente de água possa sair caso seja necessário. Os números 2, 3, 5 e 7 indicam respectivamente as tubulações por onde passam a água resfriada no reservatório de 250 L; a água em temperatura ambiente que vai ao reservatório térmico e para a entrada dos coletores; a tubulação de saída de água aquecida para consumo e a tubulação de retorno dos coletores para o reservatório térmico.

Há na instalação uma válvula eletricamente controlada e duas manuais que são indicadas pelos números 12, 13 e 14 respectivamente. Por fim o número 11 indica a localização dos coletores solares de tubo a vácuo utilizado no laboratório solar do Centro Universitário Univates.

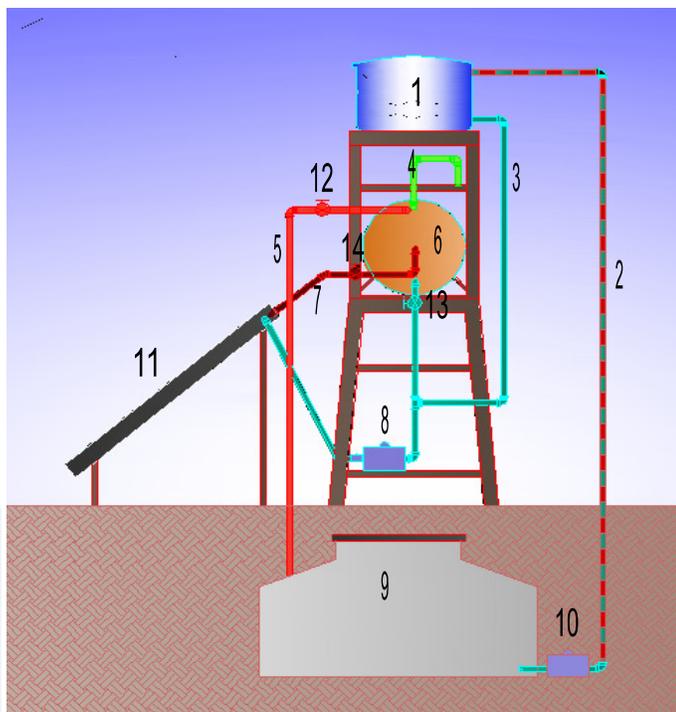


Figura 10 Partes constituintes do sistema de aquecimento do laboratório solar da Univates (adaptado de GOERCK, 2008)

Para o funcionamento deste sistema foi utilizado um controlador lógico para aquecimento solar, Classol M019, apresentado na Figura 11, de fabricação da 3A Indústria Eletrônica. De acordo com o manual do Classol, este controlador realiza as funções lógicas necessárias para manter o sistema de aquecimento solar com circulação forçada da água. O acionamento da bomba de circulação da água ocorre em função do diferencial de temperatura entre os coletores solares e o reservatório térmico.

Este controlador teve sua instalação feita com apenas 2 sensores, posicionados na saída e entrada dos coletores solares (Sensores 1 e 2 respectivamente) e instalados sobre as tubulações, sendo estes do tipo termopar. Foi configurado para acionar a bomba somente quando a temperatura na saída dos coletores fosse 5°C maior que a temperatura na entrada destes. A bomba de circulação forçada é desligada somente quando a temperatura de saída for 3°C menor que a temperatura de entrada.

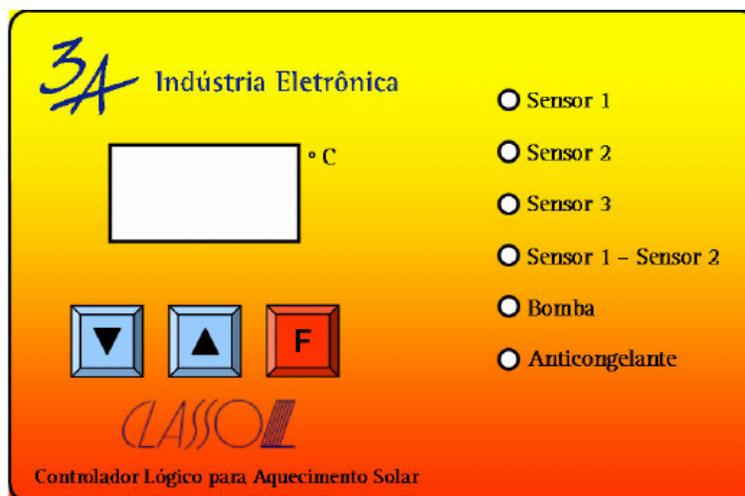


Figura 11 Controlador Lógico para Aquecimento Solar, Classol (CLASSOL, 2008)

A medição da vazão que a bomba de circulação forçada proporciona ao sistema é efetuada através de um medidor à rotor magnético de fabricação da empresa Gems Sensors (Figura 12).



Figura 12 Medidor de Vazão RFO Gems Sensors (GEMS SENSORS, 2006)

De acordo com Gems Sensor (2006), este sensor trabalha em uma faixa de 4,5 a 24 V, seu consumo de corrente elétrica é de 70 mA e possui um erro de $\pm 7\%$. Seu corpo de polipropileno pode suportar temperaturas de até 80°C. O pino do rotor é de cerâmica, para poder resistir sem problemas ao atrito local. Seu rotor é de ryton, um polímero que é magnetizado (GEMS SENSORS, 2006).

A faixa de operação e sua respectiva faixa de frequência de saída é de aproximadamente 20 Hz que representam 6 L/min como vazão mínima e aproximadamente 190 Hz ou 45 L/min em vazão máxima, isto quer dizer que se a vazão for menor do que 6 L/min ou maior do que 45 L/min, esta não será detectada

por este medidor, que pode operar em pressão máxima de 7 bar (GEMS SENSORS, 2006).

O armazenamento de dados é feito através de um módulo de aquisição e registro (*field logger*) da marca Novus, capaz de fazer 131.072 aquisições com seus 128 kB de memória. Tem resolução de 14 bits para os dados e grau de proteção IP30, de acordo com sua folha de dados (NOVUS, 2008).

Os sensores utilizados são do tipo PT100, que o módulo de aquisição e registro excita com corrente de 0,17 mA. Sua faixa de trabalho é de $-200,0^{\circ}\text{C}$ a $530,0^{\circ}\text{C}$ e sua exatidão de 0,2% da faixa máxima.

O módulo de aquisição recebe sinais de temperatura de três sensores PT100 (Figura 13), posicionados na entrada (2) e saída (3) de água dos coletores, e na saída de consumo de água (1), que estão parafusados no encanamento e em contato direto com a água.



Figura 13 Localização dos sensores PT100 da temperatura da água de consumo (a) e temperaturas de entrada e saída dos coletores (b)

A Figura 14, apresenta o perfil de temperatura do sistema inicial através dos gráficos gerados pelo módulo de aquisição e registro. Pode-se perceber o funcionamento liga/desliga da bomba indicado pela cor ciano a temperatura do reservatório térmico é representada pela linha de cor verde, a temperatura da água

que sai dos coletores é representada pela cor azul e a cor vermelha representa a temperatura da água na entrada dos coletores solares. Através deste gráfico, pode-se observar o incremento da temperatura no período que vai das 8 horas da manhã até próximo das 18 horas, onde há também o maior período de funcionamento da bomba de circulação, que fornece uma vazão muito próxima da mínima requerida pelo medidor de vazão.

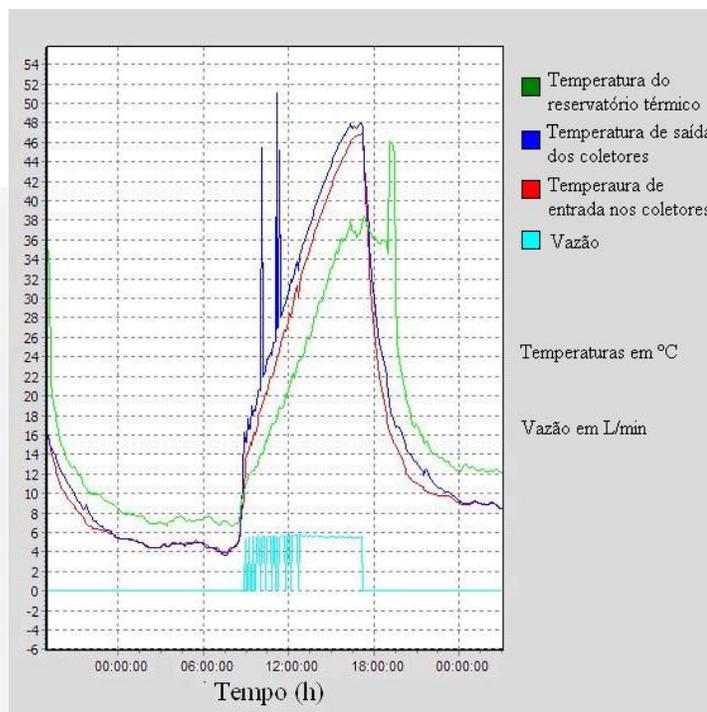


Figura 14 Gráficos de temperaturas e vazão (adaptado de GOERCK, 2008)

A água que sai dos coletores solares vai para o reservatório térmico, neste caso da marca Transsen. Este reservatório tem em seu interior, isolamento térmico de espuma de poliuretano, que tem densidade de 36 kg/m^3 e uma dissipação de calor na ordem de $0,0035 \text{ W/m.K}$, o que lhe permite reduzir as perdas ao ambiente (TRANSEN, 2006).

O tanque interno tem capacidade de 200 L e é de aço inoxidável tipo AISI304, (*American Iron and Steel Institute*), com uma cobertura externa anti-corrosão. Suas conexões também são em inox. Possui também proteção interna contra água de caráter básica ou ácida (GOERCK, 2008).

Este reservatório térmico, Figura 15, possui internamente uma resistência com potência de 2000 W instalada de fábrica. Esta é utilizada em períodos onde a

temperatura interna ao reservatório não consegue atingir um nível mínimo com o sistema de aquecimento solar. Com o auxílio desta resistência pode-se manter a temperatura interna onde se desejar.



Figura 15 Reservatórios de 100 L (não térmicos) e reservatório térmico de 200 L

A bomba de circulação forçada, da marca Xihu Eletric Machine, cuja tensão de alimentação é monofásica 220 V_{AC}, classe H, IP 44, 50 Hz e possuindo temperatura de operação de até 110°C. Esta bomba possui três potências de operação selecionáveis através de uma chave na tampa superior da caixa de ligação elétrica. Quando selecionada a potência maior, consome uma corrente elétrica de aproximadamente 0,45 A.

A bomba de reabastecimento é da marca Eletroplas. Cuja tensão de alimentação é monofásica 220 V_{AC}, classe B e IP 44 e temperatura máxima de trabalho de 60°C. Sua potência é de ½ cv a 60 Hz, consumindo 2.5 A com vazão máxima de 2,4 m³/h e com isso tem capacidade de bombear água até 32 metros de altura.

A solenóide utilizada para simular o consumo de água de uma residência, é eletricamente controlada, pois tem sua abertura controlada por um eletro-imã, que quando magnetizado desloca o êmbolo permitindo a passagem da água.

O sistema possui também dois temporizadores (Figura 16), que fazem o controle da bomba de reabastecimento e da válvula solenóide que simulam o consumo de água de uma casa.



Figura 16 Temporizadores da válvula solenóide e da bomba de reabastecimento

As tubulações por onde circula a água aquecida estavam completamente expostas, ficando desprotegidas a trocas térmicas com o ambiente, o que ocasiona uma perda de energia.

Também constatou-se a falta de aterramento nas instalações elétricas, estando assim em não conformidade com a NBR5410 e ocasionando choques elétricos ao entrar em contato com sua estrutura. Este fato pode indicar o motivo pelo qual a placa de medição de vazão e de dos sensores de temperatura terem sido danificados. A Figura 17, mostra o sensor de saída dos coletores registrando aproximadamente 530°C enquanto a placa de condicionamento do sinal de vazão não registra vazão durante um dia inteiro.

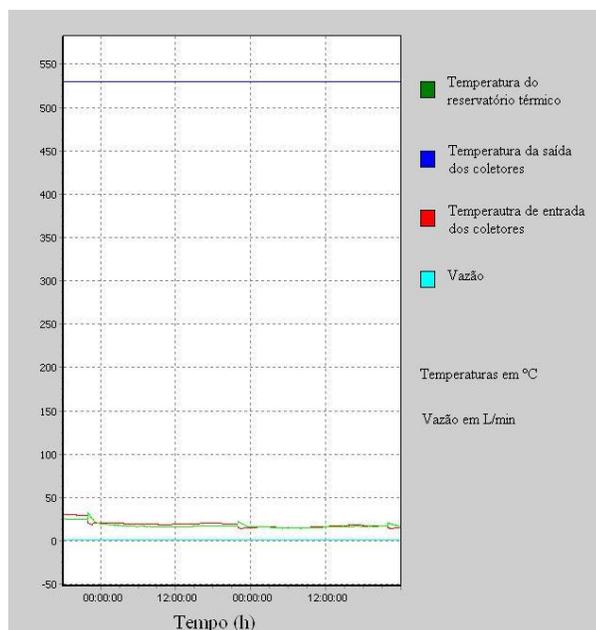


Figura 17 Gráfico com sensor PT100 e placa de condicionamento de sinal de vazão danificados

4 PROPOSTA

Este trabalho tem como proposta criar e implementar um sistema microprocessado dedicado para a gerência de um sistema de aquecimento solar com circulação forçada de água. Isto se fez através da medição e monitoração das temperaturas de entrada e saída dos coletores solares bem como a temperatura de consumo na saída do reservatório térmico e medições de vazão e luminosidade.

O primeiro passo adotado foi a remoção dos termopares, pois estes sensores de temperatura estão instalados sobre o cano, o que auxilia na dissipação de calor e por conseqüência causa uma medição inexata. Sendo assim, foram utilizados apenas os sensores PT100 que como já mencionado anteriormente, estão parafusados na tubulação em contato direto com a água.

Foram elaboradas placas de circuito impresso (PCI), para a medição de temperatura, vazão, luminosidade e para efetuar os acionamentos. Todas operando de forma independente, porém interligadas à uma placa de controle, que será responsável por efetuar os acionamentos bem como fazer a aquisição dos dados.

Visando um acréscimo de temperatura na saída do reservatório térmico de água para consumo, foram implementadas duas formas distintas de atuação do controle da bomba de circulação forçada da água que foram testadas separadamente. Estas duas formas dependem não apenas das temperaturas do sistema, mas também da luminosidade, que foi medida através de um fotodiodo.

Devido a estrutura atual, estes controles se limitaram a uma vazão mínima de 6 e máxima de 45 L/min, por estas serem as limitações físicas do medidor de vazão (GEMS SENSOR, 2006), garantindo assim, que nenhum dado de vazão fosse perdido.

Uma destas formas foi o acionamento contínuo da bomba de circulação e proporcional à intensidade luminosa. A bomba de circulação forçada, neste caso permanece acionada de forma constante, apenas variando sua velocidade de acordo com a intensidade luminosa.

A outra forma de acionamento foi de forma descontínua, ou seja, deixava a bomba de circulação forçada desligada até o momento em que a temperatura na saída dos coletores atingia 5°C a mais do que a temperatura de entrada e que fosse maior que a temperatura de consumo. Então, era acionada a bomba de circulação forçada, que permanecia ligada até que a temperatura de saída dos coletores

solares ficasse 3°C menor do que a temperatura de entrada dos coletores, ou menor que a temperatura de consumo ou ainda se a luminosidade reduzisse a um nível abaixo de 2500 lumens/m².

Como forma de viabilizar a comparação do sistema proposto com o sistema atual do laboratório solar da Univates, foi realizado o cálculo do rendimento energético do sistema que serve para determinar a quantidade de calor absorvido pela água no dado instante de tempo. Uma vez que este cálculo está vinculado diretamente com as variáveis de controle deste sistema, temperaturas de entrada e saída dos coletores solares e vazão de água.

O sistema teve em sua concepção final dois modos de funcionamento: automático e manual. No modo automático, o microcontrolador é o responsável por comandar os acionamentos das bombas e da válvula solenóide. No modo manual, estes acionamentos ficam de responsabilidade do usuário, servindo o microcontrolador apenas como interface para o acionamento.

4.1 Interface

Este projeto disponibilizou ao usuário o manuseio e visualização das informações adquiridas pelo sistema. Para a visualização das informações correntes na planta do laboratório solar, será utilizado um display de LCD de 4 linhas por 20 colunas modelo JHD-204A, da marca Shenzhen Jing Handa Eletronics, apresentado na Figura 18.



Figura 18 Display de interface

Como meio de interação entre o usuário e o sistema proposto, foram utilizados 6 botões do tipo *push-botton* para a sua operação. Destes botões, 4 foram necessários para a navegação do cursor (movê-lo para cima, baixo, esquerda e

direita), um botão com a função de “Voltar/Cancelar”, na cor vermelha e outro para “Confirmar” na cor verde.

No *display* foram apresentadas todas as variáveis manipuladas, que são as temperaturas de entrada e saída dos coletores e temperatura de consumo, a luminosidade e vazão do sistema que juntamente com o rendimento que foram exibidos na sessão “Dados”. As bombas, a solenóide e o modo (manual ou automático) do sistema foram exibidos na sessão “Acionamentos”. Já as configurações de data, hora e tempo entre cada aquisição foram exibidos e alterados na sessão de “Configurações”.

4.2 Cálculo do rendimento energético

O rendimento energético destes coletores solares foi determinado através do cálculo de capacidade de absorção de calor por líquidos e sólidos. Esta capacidade de absorção de calor, ou capacidade calorífica tem como uma de suas propriedades, que mesmo dois objetos feitos de um mesmo material terão capacidades caloríficas proporcionais à sua massa. Para isso foi definido que a capacidade calorífica por unidade de massa ou calor específico (c) se refere não a um objeto, mas sim a uma quantidade de massa unitária (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2002). Desta forma, a capacidade calorífica é expressa pela equação (1):

$$Q = mc\Delta T = mc(T_f - T_i) \quad (1)$$

onde:

Q é a capacidade calorífica;

m é a massa do objeto;

c é o calor específico;

T_f é a temperatura final do objeto;

T_i é a temperatura inicial do objeto.

Nesta equação, T_f e T_i representam respectivamente as temperaturas de saída e entrada dos coletores solares.

Levando-se em consideração a massa específica da água como aproximadamente 1 kg/m^3 , e o calor específico da água como sendo 4190 J/kg.K , pode-se então utilizar equação (1) para a determinação do rendimento energético do sistema.

4.3 Medição de vazão

Em um primeiro momento, procurou-se fazer a avaliação da precisão do medidor de vazão que está instalado no laboratório solar. Foram feitas 12 amostras, o primeiro teste foi feito visando-se calcular a vazão através do tempo necessário para se ter 2 L e ou outros testes (2, 3 e 4), foram feitos para se observar qual a quantidade de água em litros fluiria pelo sistema nos tempos de aproximadamente 15, 30 e 60 segundos respectivamente. Com isso pode-se observar que a bomba de circulação forçada fornece uma vazão média de 14,16 L/min após estas 12 amostras. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 1 Testes de vazão

| Testes de vazão | | | | |
|-----------------|------------|-----------|---------------|---------------|
| Teste | Litros (L) | Tempo (s) | Vazão (L/min) | Desvio padrão |
| 1 | 2,00 | 8,23 | 14,58 | 0,11 |
| | 2,00 | 8,17 | 14,69 | |
| | 2,00 | 8,29 | 14,47 | |
| 2 | 3,55 | 15,30 | 13,92 | 0,47 |
| | 3,67 | 15,23 | 14,38 | |
| | 3,46 | 15,42 | 13,45 | |
| 3 | 7,21 | 30,32 | 14,26 | 0,27 |
| | 6,97 | 30,21 | 13,85 | |
| | 7,27 | 30,38 | 14,36 | |
| 4 | 14,15 | 60,34 | 14,07 | 0,09 |
| | 14,04 | 60,27 | 13,98 | |
| | 13,95 | 60,25 | 13,89 | |

Para fazer a conversão da frequência de saída do medidor de vazão, foi utilizado o circuito integrado (CI) LM2907. Este possui uma linearidade de $\pm 0,3\%$ e sua alimentação mínima é de 12 V, mas suporta até 28 V (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2003).

Seu esquema de ligação mostrado na Figura 19, onde o sinal de entrada em frequência é conectado ao pino 1, que é conectado internamente a um amplificador operacional diferencial, no seu pino de entrada positiva. Este por sua vez, tem o pino de entrada negativa conectado ao terra (referência), o que obriga o sinal de entrada cruzar o sinal de referência.

O segundo estágio logo após o amplificador é denominado *charge pump* onde a frequência é convertida em tensão CC, para isso são necessários um capacitor de filtro (conectado ao pino 2 do CI), um resistor de saída (conectado ao pino 4 do CI) e

um circuito de tempo (conectado ao pino 3 do CI). Quando a entrada no pino 1, muda de estado, ou seja, tem um cruzamento por 0 V o capacitor conectado no pino 3, carrega e descarrega entre duas tensões as quais a diferença é $V/2$. Assim, um ciclo igual a $\frac{1}{2} f_{IN}$ a mudança na carga sobre o capacitor é igual a $(V/2) \cdot C$. O valor médio da corrente que sai do capacitor é expressa por:

$$I_c = 2\pi V f_e C \quad (2)$$

onde:

V é a tensão de alimentação;

f_e é a frequência de entrada;

C é o capacitor de $0,01 \mu\text{F}$ da Figura 19;

Por fim o circuito de saída espelha a corrente no resistor conectado ao pino 4, sua tensão de saída é expressa pela equação (3) abaixo:

$$V_{SAÍDA} = V f_e R C K \quad (3)$$

onde:

V é a tensão de alimentação;

f_e é a frequência de entrada;

R é o resistor de $100 \text{ k}\Omega$ da Figura 19;

C é o capacitor de $0,01 \mu\text{F}$ da Figura 19;

K é uma constante do circuito do LM2907N.

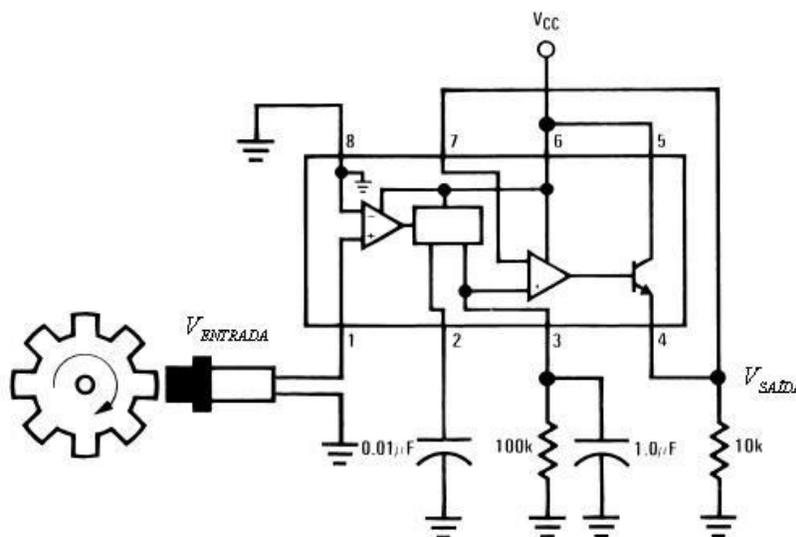


Figura 19 Esquema de ligação do LM2907N (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2003)

E como últimas considerações sobre o LM2907N, sua temperatura de operação vai de -40°C a 85°C e a frequência máxima de operação pode ser determinada através da equação:

$$f_{MAX} = \frac{I}{VC} \quad (4)$$

onde:

f_{MAX} é a frequência máxima de entrada;

V é a tensão de alimentação;

C é o capacitor de $0,01 \mu\text{F}$;

I é a corrente que sai do pino 3 do LM2907N;

Foram utilizadas duas fontes de alimentação uma positiva de 15 V para o LM2907N e outra negativa de 5 V. Esta segunda fonte é a referência do medidor de vazão, ou seja, seu 0 V. Isto se fez necessário para que o sinal de saída do medidor de vazão possuísse um cruzamento pelo 0 V do conversor de frequência para tensão, LM2907N, que como mencionado anteriormente necessita disto devido à comparação que o amplificador operacional faz em sua entrada, ou caso contrário interpretará o sinal como sem variação, ou seja, CC e assim não terá valor algum na saída. O resultado disto é apresentado na Figura 20.

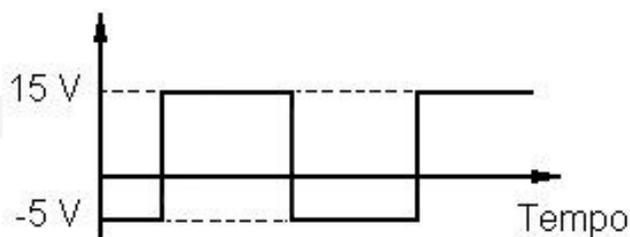


Figura 20 Saída do medidor de vazão

Foi também calculado juntamente com o divisor de tensão um capacitor para que desta forma proporcionasse um filtro passa – baixa (Figura 21).

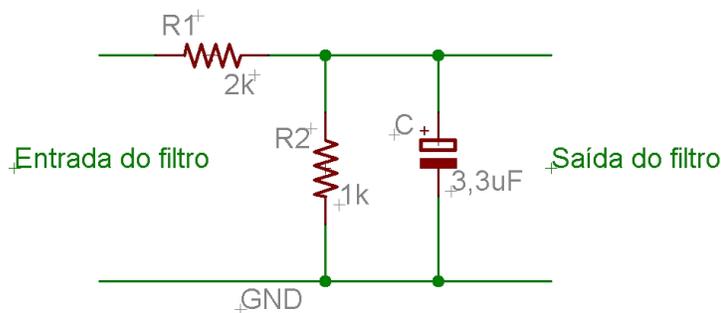


Figura 21 Divisor de tensão e filtro

Este capacitor de filtro foi calculado através da equação (5):

$$f_c = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} \quad (5)$$

onde:

f_c é a frequência de corte do filtro;

R_1 e R_2 são as resistências do divisor de tensão;

C é o capacitor do filtro;

Como foram utilizados resistores de precisão (1%) e R_1 é de 2 k Ω e R_2 é de 1 k Ω , logo obtém-se que uma capacitância de 3,3 μ F proporcionará uma frequência de corte máxima de 500 Hz.

A Figura 22, apresenta o esquemático da placa de condicionamento do sinal de vazão com as duas fontes de alimentação, com o circuito de conversão de frequência para tensão do LM2907N. O sinal do medidor de vazão é condicionado através de um divisor de tensão para o qual foram utilizados resistores de precisão.

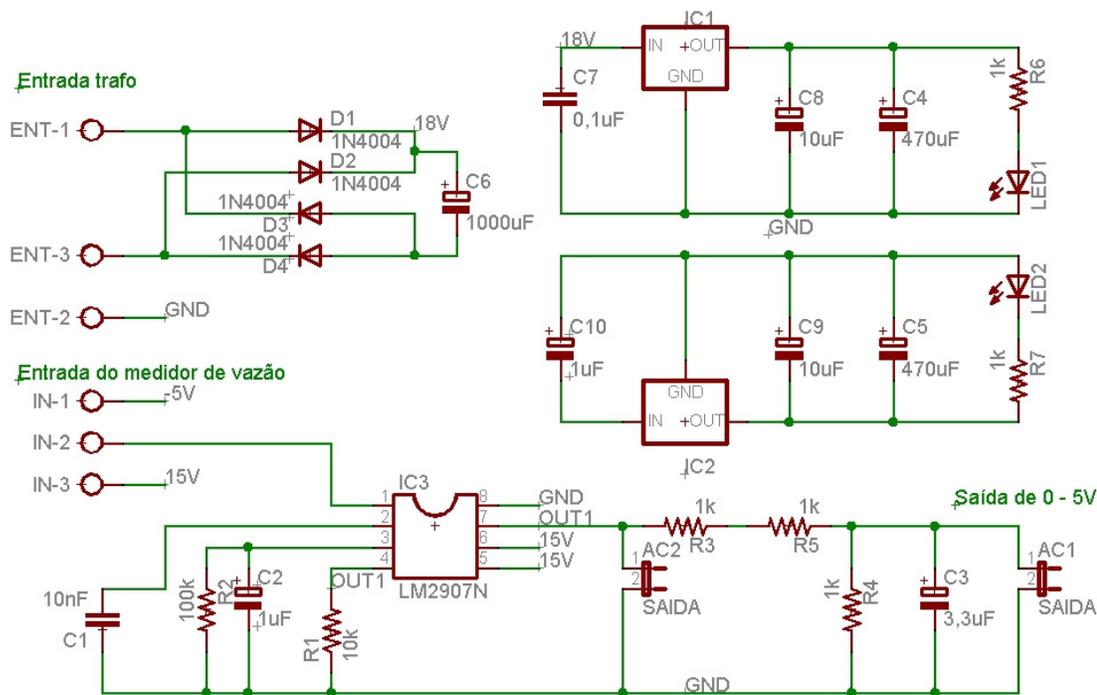


Figura 22 Esquemático da placa de condicionamento de sinal de vazão

A placa de condicionamento do sinal de vazão teve a seguinte apresentação demonstrada na Figura 23.



Figura 23 Placa de condicionamento de sinal de vazão

4.4 Medição de luminosidade

Para a medição de luminosidade do sistema foi utilizado o CI OPT101 que possui uma janela de 0,2286 x 0,2286 mm, permitindo que a luz atinja diretamente seu fotodiodo. O sinal deste fotodiodo é condicionado internamente.

Opera em tensões de 2,7 a 36 V, seu consumo de corrente é de apenas 120 μA e sua temperatura de operação é de 0°C até 70°C (BURR-BROWN, 1994). Como este CI precisou ser exposto diretamente à luz do dia, foi necessária uma ventilação forçada em sua caixa de acondicionamento, a fim de evitar que a temperatura suba acima do limite estabelecido pelo fabricante.

Seu esquema de ligação e diagrama interno é apresentado na Figura 24, a fim de gerar uma saída de tensão proporcional à luminosidade. Seu valor máximo é sua tensão de alimentação menos aproximadamente 1,15 V, que neste caso foi de 4,2 V (BURR-BROWN, 1994).

Burr-Brown (1994), também cita que a tensão de saída é um produto da corrente do fotodiodo, I_D e da realimentação através do resistor R_E de 1 M Ω ($I_D R_E$) somado a tensão V_B que é aproximadamente 7,5 mV através de um amplificador operacional.

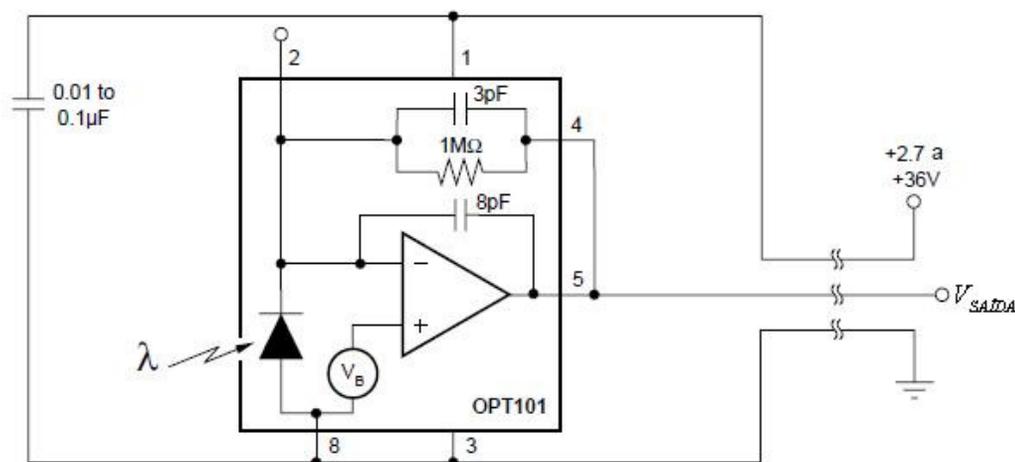


Figura 24 Esquema de ligação e diagrama interno do OPT101 (BURR-BROWN, 1994)

Este CI oferece uma saída em tensão proporcional e praticamente linear para luz visível, de acordo com a intensidade luminosa, o que pode ser observado na Figura 25, na região central de 400 a 750 nm (BURR-BROWN, 1994).



Figura 25 Resposta espectral do OPT101 (adaptado de BURR-BROWN, 1994)

Para auxiliar na aferição e calibração das medidas do OPT101, foi utilizado um luxímetro, instrumento este capaz de medir a quantidade de luz por metros quadrados.

O luxímetro utilizado foi o EZ-100+ de 3 ½ dígito, que possui resolução mínima de 0,1 e repetibilidade de $\pm 2\%$ sendo que sua resolução pode variar $\pm 0,1\%/^{\circ}\text{C}$. Este luxímetro vem calibrado de fábrica através de uma lâmpada incandescente de 2856 K.

Para que se pudesse testar o valor de saída do OPT101 foi feita uma comparação entre o valor de tensão de saída do CI e do valor em lumens/ m^2 que o luxímetro indicou.

Para todos os valores de luminosidade acima de 830 lumens o OPT101 estava em seu valor máximo na saída. Como um dia nublado tem luminosidade de pelo menos 6700 lumens, a placa de medição de luminosidade, foi instalada de forma a não receber os raios solares diretamente. Isto significa que este não ficou diretamente abaixo da janela de entrada de luz da caixa de condicionamento, capturando assim, uma luminosidade indireta, o que possibilitou sua utilização para este experimento.

Esta forma de expor o OPT101 à luz resultou na Tabela 2, uma comparação entre este e o luxímetro.

Tabela 2 Dados de luminosidade do OPT101 de forma indireta

| Coletas de luminosidade com anteparo | |
|--------------------------------------|-----------------------|
| OPT101 | lumens/m ² |
| 1,0 | 1100 |
| 1,5 | 2500 |
| 2 | 3300 |
| 2,4 | 4400 |
| 3,0 | 4900 |
| 3,8 | 7300 |
| 4,2 | 7600 |

Com base nestes valores de tensão de saída, foi determinada a velocidade de acionamento da bomba de circulação forçada e a forma de atuação, direta ou por picos de vazão.

O esquemático da placa de medição de luminosidade é apresentado na Figura 26, onde se pode ver os capacitores de 100 nF utilizados para filtragem e como foi utilizado o resistor de 1 M Ω interno do próprio CI, para a realimentação do circuito interno, o pino 5 da saída foi conectado ao pino 4 da realimentação.

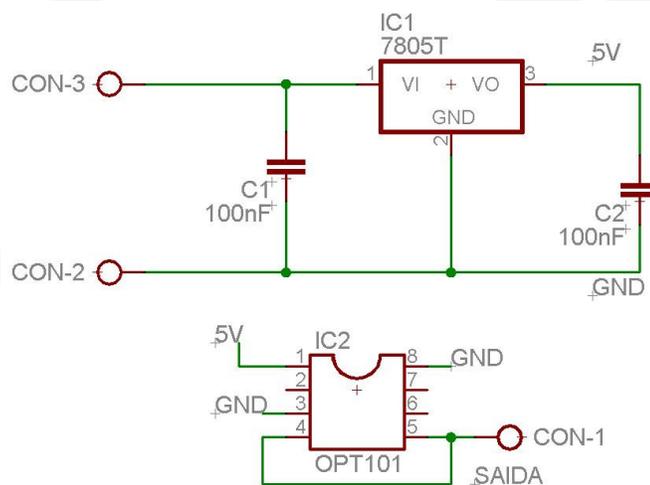


Figura 26 Esquemático da placa de medição de luminosidade

4.5 Medição de temperatura

Para a medição de temperatura, se utilizou o conjunto de 3 sensores PT100 a 3 fios já presentes na planta de energia solar. Estes sensores são baseados na

variação de sua resistência elétrica proporcionalmente à temperatura a qual estão submetidos (PALLÀS-ARENY; WEBSTER, 2001).

Sensores de temperatura captam a temperatura de sua vizinhança, sendo que para medir a temperatura da água é necessário contato direto, o que foi possível com os sensores da Figura 27 (PALLÀS-ARENY; WEBSTER, 2001).

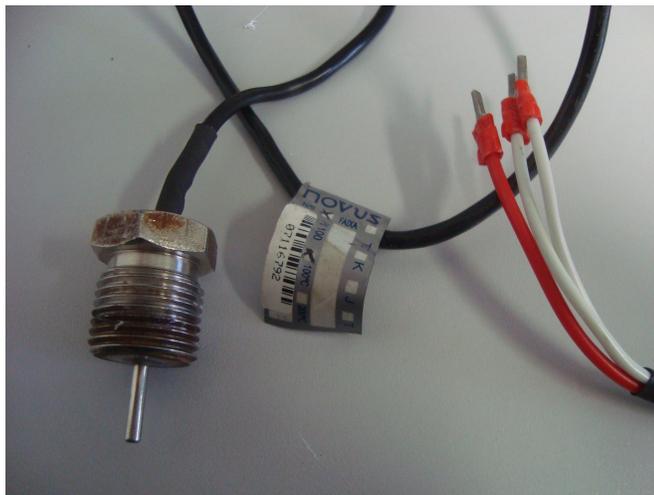


Figura 27 Sensor PT100

Por serem de platina, estes sensores possuem a característica mais linear de relação entre resistência e temperatura (MORIS, 2001).

Para a obtenção do sinal dos sensores, estes foram conectados a pontes de Wheatstone a 3 fios. Circuitos em pontes são utilizados comumente como uma variável de conversão em sistemas de medidas, produzindo uma saída em forma de tensão, que varia de acordo com a variação da medida física (PALLÀS-ARENY; WEBSTER, 2001).

Uma compensação a três fios pode ser utilizada para solucionar o problema entre a resistência do cabo, a resistência e temperatura do sensor e a ponte (BOLTON, 2004), como pode ser visto na Figura 28.

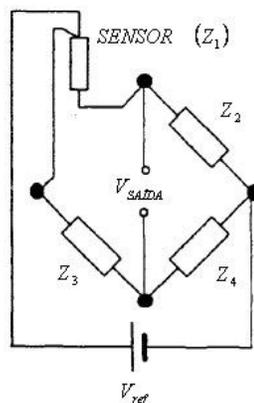


Figura 28 Compensação a três fios (BOLTON, 2004)

A ponte de Wheatstone é considerada balanceada quando a divisão das impedâncias de um lado da ponte é igual a divisão das impedâncias do outro lado da ponte, ou seja, quando a seguinte condição é alcançada:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (6)$$

E de acordo com Fraden (2004), sua tensão de saída pode ser representada da seguinte forma:

$$V_{SAÍDA} = \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) V_{ref} \quad (7)$$

A excitação do circuito da ponte foi executada através de uma fonte de corrente. Esta foi implementada através do circuito integrado TL741 que proporcionou uma tensão de referência fixa. Já o amplificador operacional, OP77, foi utilizado para limitar a corrente no circuito, fornecendo portanto, uma corrente fixa de 1 mA para o circuito da ponte.

Como a ponte de Wheatstone apresenta uma saída de tensão diferencial entre seus terminais centrais, assim, foi utilizado um amplificador de instrumentação. O amplificador escolhido foi o INA114, que é recomendado para o condicionamento do sinal de pontes, além de possuir uma tensão de offset muito baixa. Este ao amplificar o sinal que é da ordem de milivolts para volts, permitirá assim uma melhor resolução do conversor analógico-digital do PIC.

O esquema de ligação deste amplificador de acordo com Burr-Brown (1992), é apresentado na Figura 29. Utiliza tensão simétrica de alimentação, pinos 7 e 4,

que neste caso será de +12 e -12 V. Este CI, tem o ganho ajustado através de um único resistor conectado entre os pinos 1 e 8 e sua entrada diferencial é nos pinos 2 e 3.

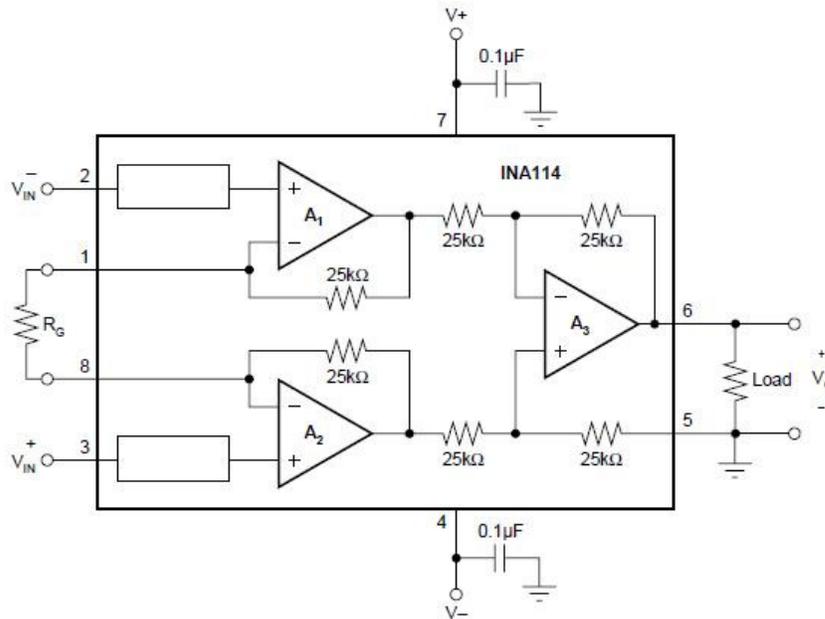


Figura 29 Esquema de ligação do INA114 (BURR-BROWN, 1992)

Para o cálculo do ganho que o amplificador de instrumentação proporcionou, foram utilizadas as tensões máximas de entrada do conversor analógico-digital do PIC e da saída da ponte, que foi equacionado da seguinte maneira:

$$G = \frac{V_{MAX}}{V_{MAX_ENTRADA}} \quad (8)$$

onde:

G é o ganho do sistema;

V_{MAX} é a tensão máxima que é tida como válida para a entrada do conversor analógico – digital do PIC;

$V_{MAX_ENTRADA}$ é a tensão máxima de entrada do INA114;

Assim, adota-se V_{MAX} como 5 V e $V_{MAX_ENTRADA}$ como 8,3 mV, que foi o resultado de um teste com temperatura à 100°C. Logo chega-se que G é de aproximadamente 602,409.

Assim, o ganho do amplificador de instrumentação INA114, pode ser calculado através da seguinte equação:

$$G = 1 + \frac{50000}{R_G} \quad (9)$$

onde:

G é o ganho do sistema;

R_G é a resistência conectada nos pinos 1 e 8;

Desta forma, a equação do ganho fica:

$$602,409 = \frac{50000}{R_G} \quad (10)$$

Logo, obtém-se que o valor de R_G é de 83Ω para o fundo de escala de 100°C , sendo que foi utilizado o resistor comercial de 82Ω , sendo que este erro proveniente da diferença de 1Ω foi corrigido via software na programação do PIC.

O circuito de condicionamento dos sinais de temperatura é apresentado na Figura 30. Este circuito foi replicado três vezes na placa de condicionamento dos sinais de temperatura, para que assim que as três entradas de temperaturas utilizadas no sistema de aquecimento solar do laboratório da Univates fossem condicionadas na mesma placa.

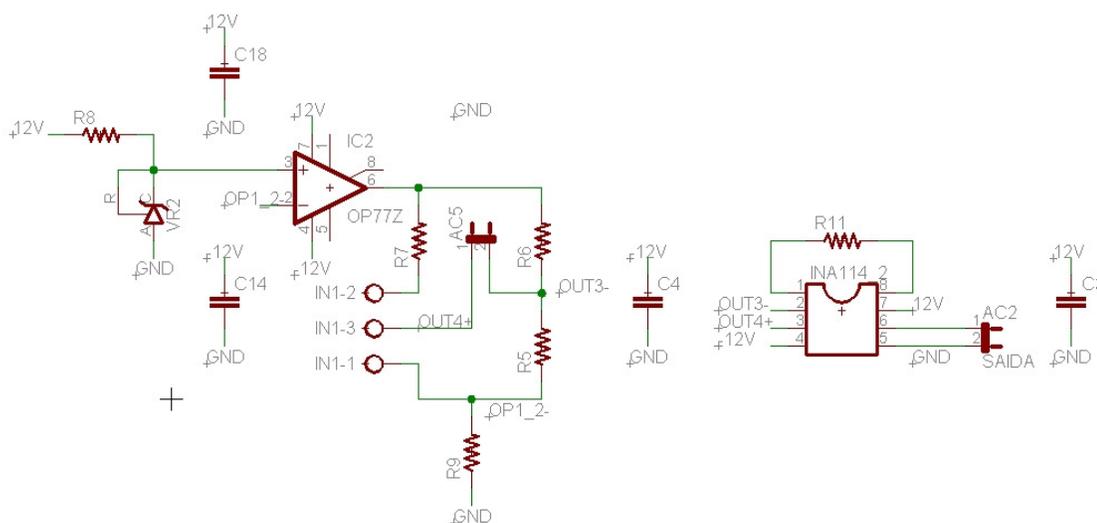


Figura 30 Circuito de condicionamento do sinal do PT100

O circuito das fontes de 12 V positiva e negativa, que alimentaram o circuito apresentado na figura anterior, é apresentado na Figura 31.

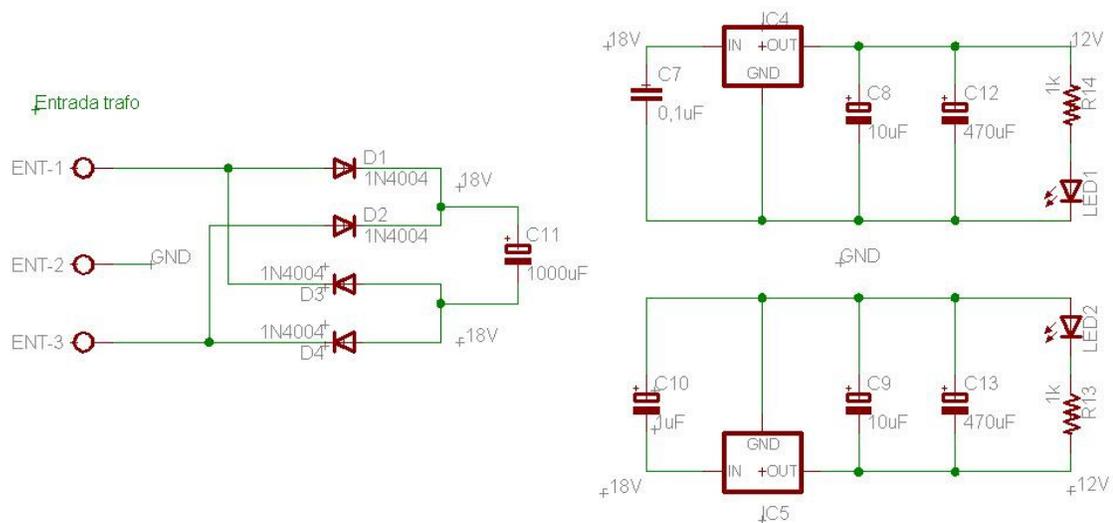


Figura 31 Fontes de alimentação para o circuito de condicionamento de sinal dos PT100

A placa final ficou com a configuração apresentada na Figura 32.

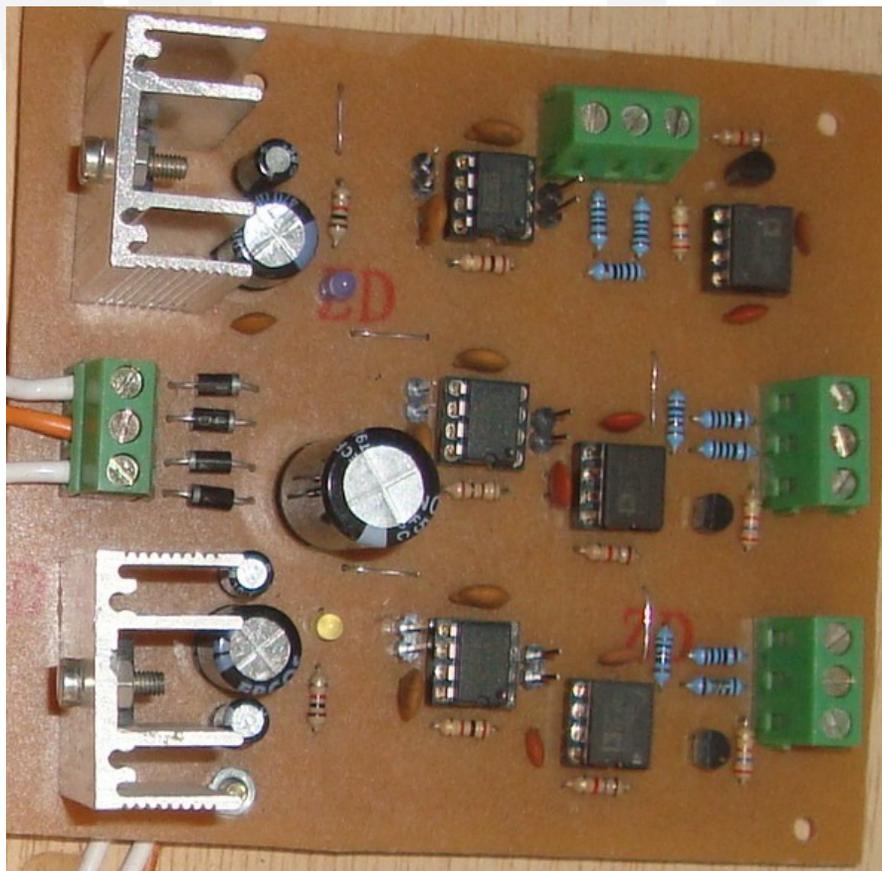


Figura 32 Placa do circuito de condicionamento de sinal dos PT100

4.6 Placa de controle e aquisição das medidas

Para gerir os acionamentos, efetuar e salvar as aquisições e disponibilizar ao usuário as informações foi utilizado um microcontrolador. Este teve a necessidade de se comunicar com o usuário e via SPI[®] (*Serial Peripheral Interface*) com a memória, além de controlar algumas portas de entrada e saída para o display, botões e entradas analógicas de luz, vazão e temperaturas, gerindo assim todas as informações do sistema.

O microcontrolador escolhido foi o PIC18F4550[®], por possuir 13 entradas analógicas com resolução de 10 bits e 35 pinos que podem ser programados para entrada ou saída as seguintes características: 32 kB de memória interna para sua programação, 2048 bytes de memória SRAM (*Static Random Access Memory*) e mais 256 bytes de memória EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) para dados (MICROCHIP, 2006).

Além disto, possui três interrupções externas, quatro temporizadores e uma tensão de operação de 2 até 5,5 V. Sua temperatura de operação pode estar entre -40°C e 85°C.

O protocolo de comunicação SPI[®] foi desenvolvido pela Motorola. Era destinado à linha de processadores da família MC68K e opera em modo *full-duplex* com comunicação síncrona que ocorre em 2 sinais de dados, um para o *clock* e outro para a seleção de *chip* quando utilizados mais de um escravo.

Abaixo na Figura 33, pode ser observada a comunicação entre um mestre e diversos dispositivos escravos. Nota-se que a seleção do dispositivo escravo ao qual será lido ou escrito algum dado, é feita através do pino /SS.

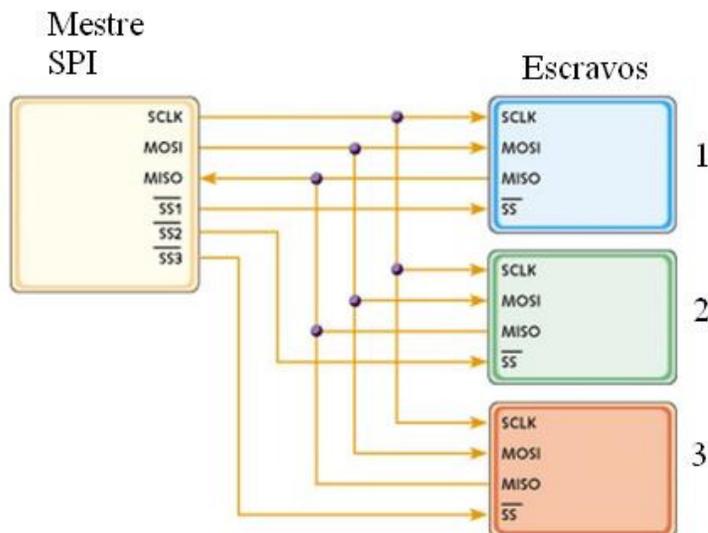


Figura 33 Comunicação SPI (TERROSO, 2004)

As conexões MOSI (*Master data Output, Slave data Input*) e MISO (*Master data Input, Slave data Output*), significam respectivamente saída de dados do mestre, entrada de dados do escravo e entrada de dado do mestre, saída de dado do escravo.

Para salvar as aquisições executadas foi utilizada uma memória de 512 kB de capacidade também da Microchip, a 25AA512[®]. Esta EEPROM possui uma interface serial SPI[®]. Tem sua faixa de tensão de alimentação de 1,7 até 5,5 V e sua temperatura de operação, da mesma forma que o microcontrolador, é de -40°C até 85°C (MICROCHIP, 2007).

A Figura 34, apresenta os pinos da memória, onde através do pino 1, seleção de *chip* (*Chip Select*) se faz sua habilitação, para que então seja feita a transmissão de dados. Esta ocorre nos pinos, 2 (SO, *Serial Output*), 5 (SI, *Serial Input*) e 6 (SCK, *Serial Clock*).

PDIP/SOIC/SOIJ (P, SN, SM)

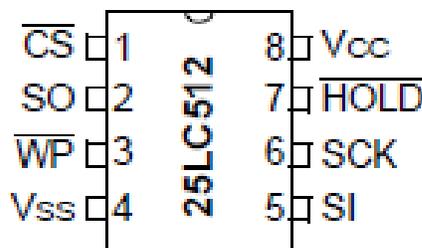


Figura 34 Pinos da memória 25AA512 (MICROCHIP, 2007)

Os botões que serão o meio de interagir com o microcontrolador, utilizarão uma lógica normalmente aberta (*pull-down*), ou seja, estarão sempre em nível zero de tensão, e quando pressionados, habilitam a passagem de 5 V para o pino do PIC.

A lógica de programação utilizada é apresentada na Figura 35, onde inicialmente o microcontrolador configura e inicializa as portas, comunicações, o *display* e as interrupções. Em um segundo passo, inicializa as variáveis do programa efetuando uma primeira leitura dos valores de temperatura, vazão e luminosidade. Assim, depois disto, se o usuário habilitar, o sistema começa a fazer as aquisições. Na seqüência, se o modo automático estiver acionado e somente se as condições estiverem adequadas, efetuará o acionamento. Por fim, se o usuário habilitar o envio de dados, o sistema os envia.

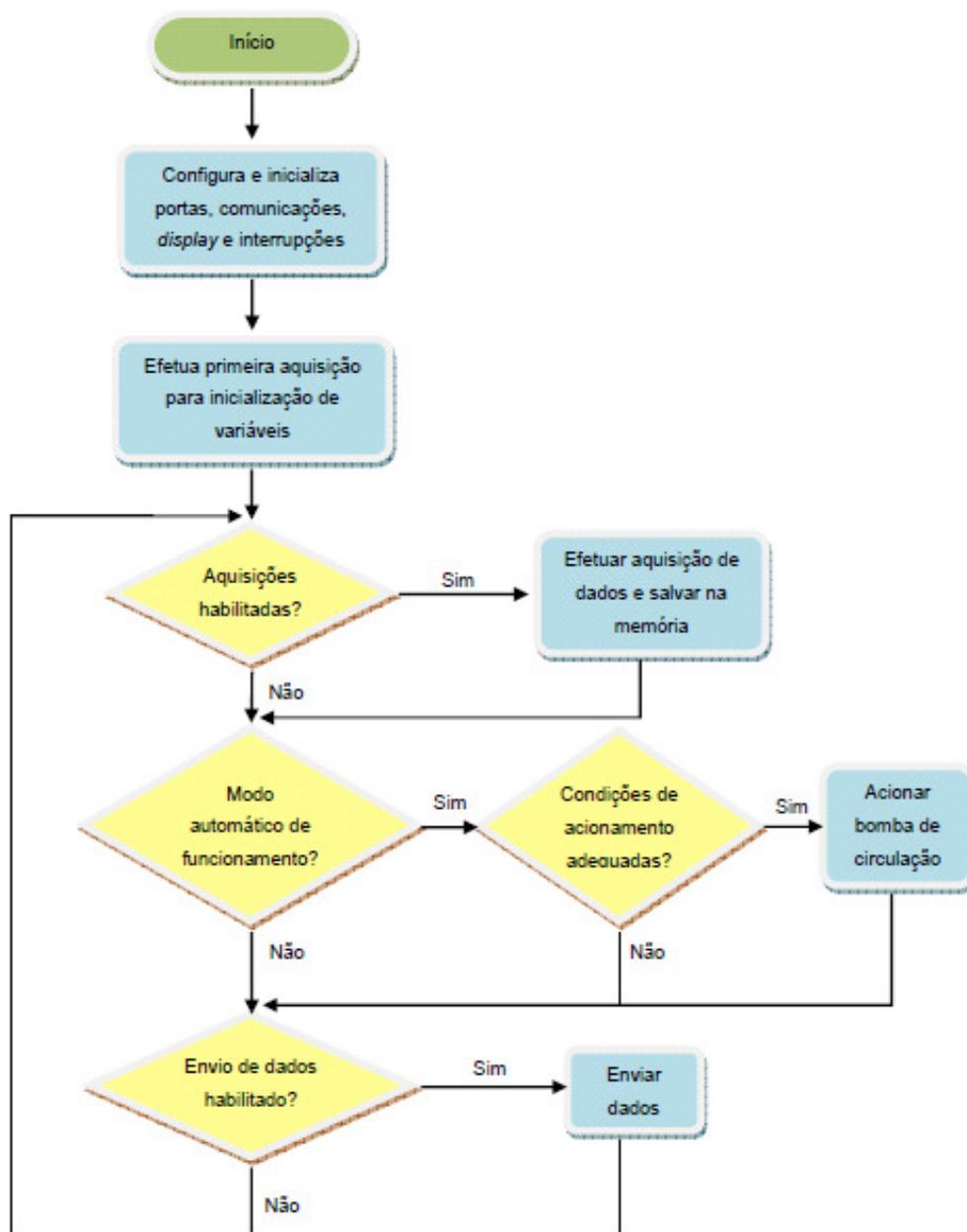


Figura 35 Fluxograma do programa da placa de geração e controle do PWM

O esquemático da placa de controle elaborada é apresentado na Figura 36, onde pode-se observar a memória que é conectada aos pinos 21 (CS), 33 (SDI) e 34 (SCK), conexão serial e USB, as entradas analógicas conectadas aos pinos 2 até 5 e o pino 7. Os botões foram conectados aos pinos 19, 20, 27, 28, 29 e 30 bem como a conexão para o display JHD-204A que está conectado na porta B.

Além das conexões pode-se observar que foi utilizado para a comunicação serial e com a memória LEDs para indicar a comunicação.

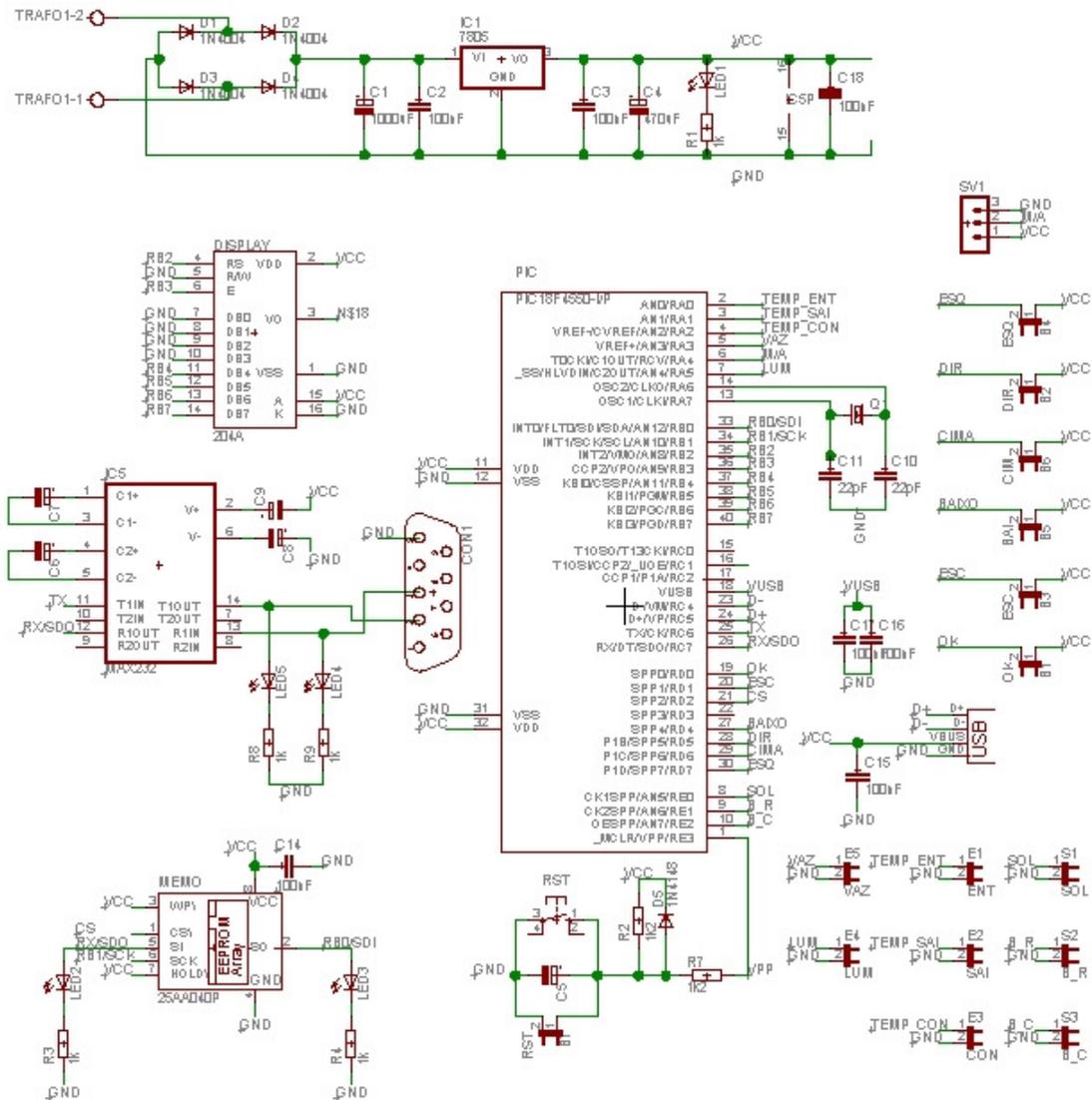


Figura 36 Esquemático da placa de aquisição e controle

Desta forma, a placa de aquisição e controle teve a configuração final dos componentes da seguinte maneira apresentada na Figura 37.

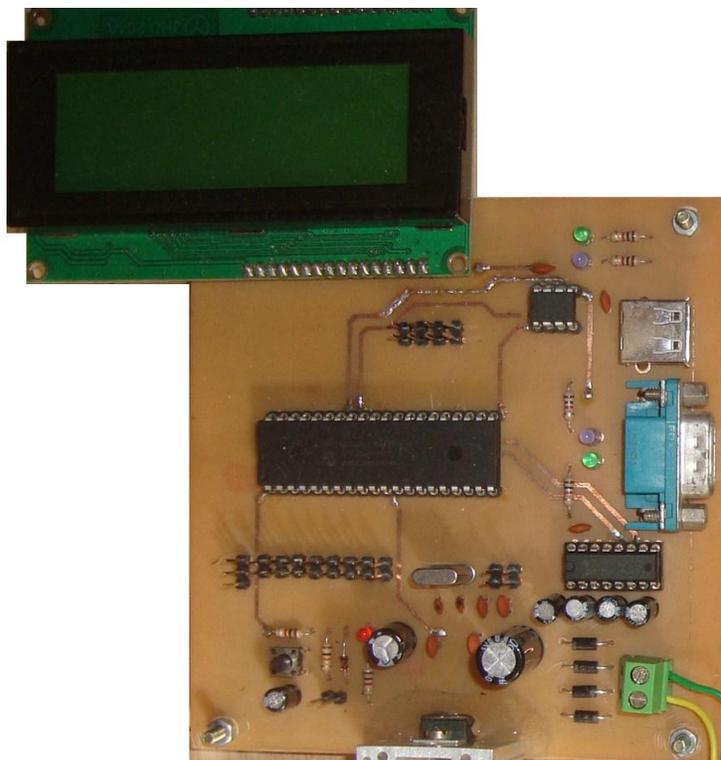


Figura 37 Placa de aquisição e controle

4.7 Atuações

Para atuação no sistema, existem a bomba de circulação forçada, a bomba de reabastecimento e a válvula solenóide. A bomba de circulação forçada da água foi acionada por um inversor de frequência monofásico, já a bomba de reabastecimento e a válvula solenóide foram atuadas por acionamento direto liga/desliga.

Os acionamentos da válvula solenóide e da bomba de reabastecimento se deram através de um relé de contato, assim, para o acionamento do relé com bobina de 12 V foi utilizado também um optoisolador MOC3022 (MOTOROLA, 1995).

Já o acionamento da bomba de circulação forçada, tem seu inversor elaborado baseado no trabalho de Tiggemann (2008), que desenvolveu um inversor de frequência monofásico de baixa potência. Para esta aplicação, algumas alterações se fizeram necessárias, a fim de viabilizar o acionamento proporcional: foi utilizado uma entrada analógica do pino 8, e para habilitar ou desabilitar seu funcionamento de modo geral foi utilizado também uma entrada digital (pino 9 do PIC).

4.7.1 Acionamento da válvula solenóide e da bomba de reabastecimento

Para fazer o acionamento da válvula solenóide do sistema, foi utilizado o optoisolador MOC3022. Este CI tem a capacidade de permitir a passagem de sinal elétrico através dos pinos 6 e 4, quando o LED interno for excitado nos pinos 1 e 2, como mostra o diagrama interno apresentado na Figura 38.

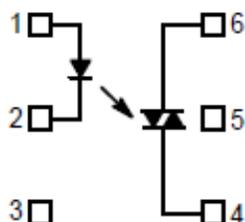


Figura 38 Diagrama interno do MOC3022 (MOTOROLA, 1995)

Este componente possui como características uma corrente de excitação de 10 mA mínima necessária. Resiste a uma tensão de até 400 V e tem sua temperatura ambiente de trabalho na faixa de -40°C até 85°C sendo que é recomendado para aplicações em 115/240 V_{AC} com válvulas e solenóides (MOTOROLA, 1995).

Neste trabalho, o MOC 3022 foi utilizado para o chaveamento da tensão de 12 V para o relé, que por sua vez faz o chaveamento da tensão 220 V_{AC} para a válvula solenóide ou a bomba de reabastecimento. A Figura 39, mostra o esquemático do comando de acionamento. Na placa de acionamento este circuito é reproduzido duas vezes uma para cada acionamento.

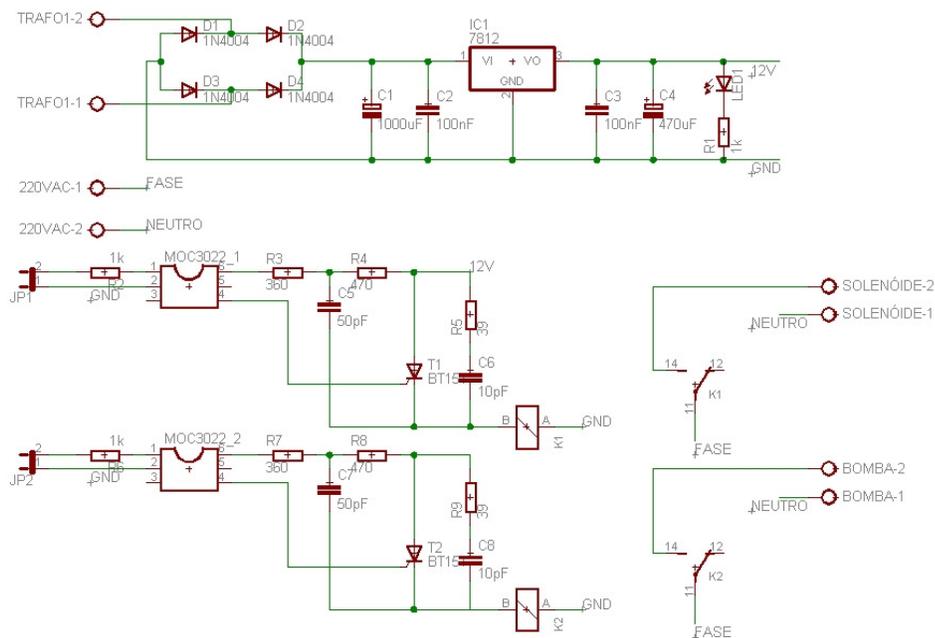


Figura 39 Esquemático do comando de acionamento da bomba de reabastecimento e da válvula solenóide

4.7.2 Acionamento da bomba de circulação forçada

Para fazer o controle de velocidade da bomba de circulação forçada foi implementado um inversor de frequência monofásico de baixa potência. Para isso foi implementada a topologia em ponte completa, modulada por PWM senoidal por apresentar menor conteúdo harmônico de baixa ordem (TIGGEMANN, 2008).

Para esta topologia, foram utilizadas quatro chaves semicondutoras, sendo que cada uma é conectada em antiparalelo. São comutadas em diagonal, fazendo com que a fonte CC fique conectada à carga de forma alternada (AHMED, 2000).

A técnica de modulação por PWM senoidal, ou SPWM, se baseia na comparação de uma onda de referência senoidal, com uma onda triangular de alta frequência. O cruzamento destas duas, estabelece o tempo de condução de cada uma das chaves semicondutoras (AHMED, 2000).

Este inversor de frequência foi constituído de quatro blocos, fonte de alimentação CC, placa de controle do PWM, placa dos drivers e a placa de potência.

Para o controle do inversor de frequência foi utilizado um microcontrolador exclusivamente para descentralizar o processamento e evitar possíveis falhas na geração do PWM. Para tanto foi utilizado o PIC16F877A por este possuir as

necessidades básicas para o acionamento. Este microcontrolador possui as seguintes características: 14,3 kB de memória interna para sua programação, 368 bytes de memória SRAM (*Static Random Access Memory*) e mais 256 bytes de memória EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) para dados (MICROCHIP, 2003).

Possui 40 pinos, sendo destes 33 pinos podem ser programados para entrada ou saída. Ainda destes 40 pinos, 8 são conversores analógico-digitais, com resolução de 10 bits. Além disto, possui três temporizadores e uma tensão de operação de 2 até 5,5 V. Sua temperatura de operação pode estar entre -40°C e 85°C.

A Figura 40 apresenta o fluxograma do programa utilizado pela placa de geração e controle do PWM, onde em um primeiro instante, será efetuada a leitura do conversor analógico – digital, as variáveis são inicializadas no segundo momento. O tempo de condução, ou aqui chamado de vetor de senos é calculado no terceiro momento, que determina qual é o tempo que cada pulso do PWM ficará ativo. No quarto momento, é configurado o *Timer 2*, depois disso fica esperando o sinal de acionamento da placa de aquisição e controle para então acionar a bomba de circulação. A reconfiguração ocorre em um intervalo de tempo definido pelo programado.

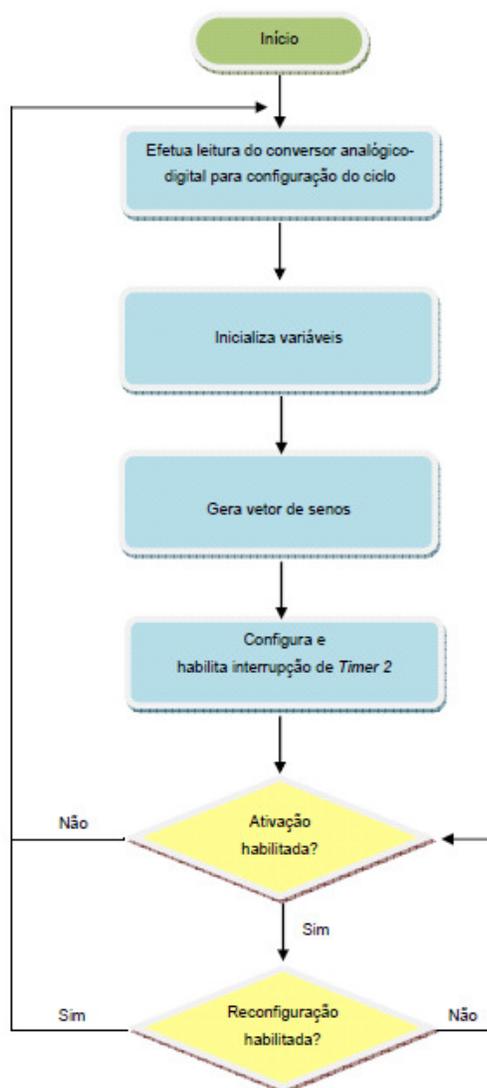


Figura 40 Fluxograma do programa da placa de geração e controle do PWM

A Figura 41 mostra o esquemático da placa de geração e controle do PWM, esta teve uma alteração feita para que a fonte de 5 V estivesse junto da placa de controle, diferentemente de sua topologia no trabalho de Tiggemann (2008). Porém, os acréscimos mais significativos se deram pela adição da entrada analógica e digital, que possibilitou à placa de aquisição e controle, controlar o inversor.

Esta placa possui comunicação serial, e tem um circuito com portas inversoras para que desta forma seja criado um tempo morto entre os acionamentos de cada chave, garantindo via hardware que duas chaves sejam acionadas ao mesmo tempo evitando assim um curto circuito.

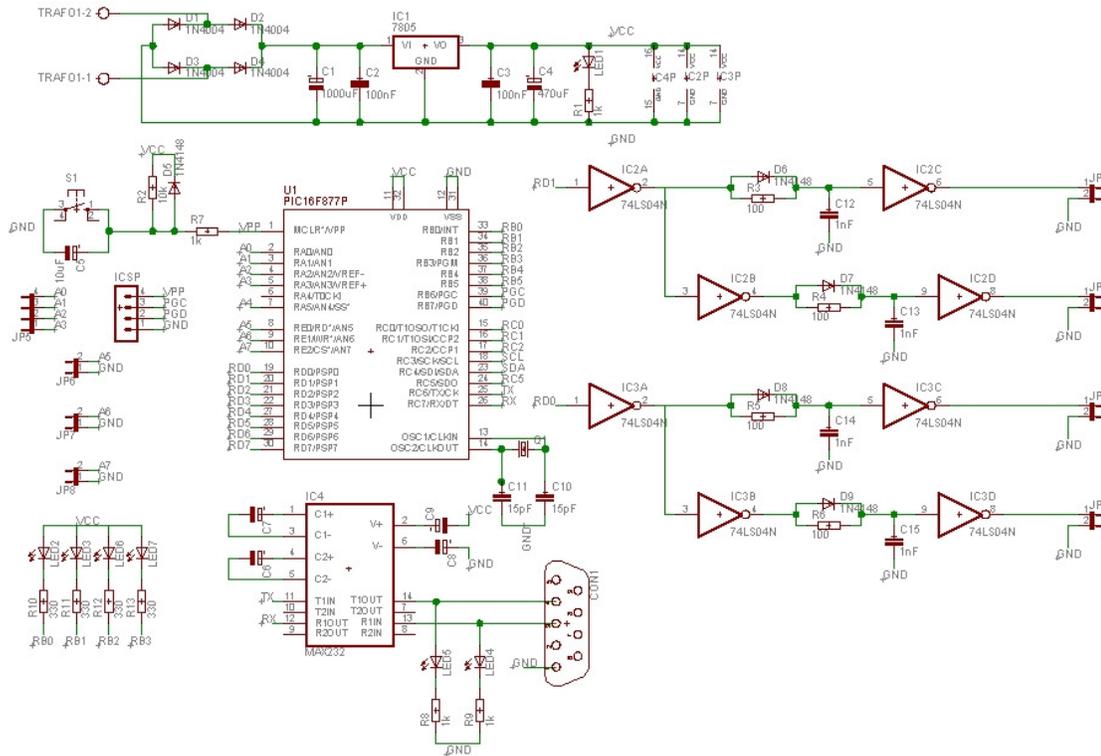


Figura 41 Esquemático da placa de geração e controle do PWM

A placa de geração e controle do PWM é apresentada n Figura 42.

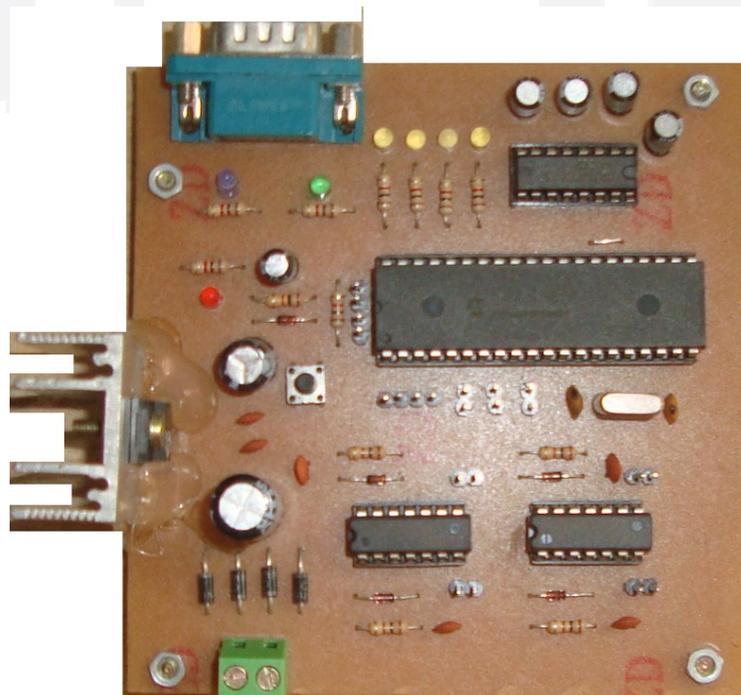


Figura 42 Placa de controle do PWM

Para o circuito dos drivers, que é apresentado na Figura 43, ocorreu uma pequena alteração, onde a alimentação de 15 V que está sendo chaveada através do optoisolador HP2601 ficou diretamente associada à placa. Foram utilizadas quatro placas iguais a esta, cada uma para o acionamento de um dos transistores. Este circuito tem na saída do optoisolador uma sequência de transistores que se fazem necessários para o chaveamento do sinal bem como a sensibilidade do chaveamento para a placa de potência que faz o acionamento da bomba de circulação.

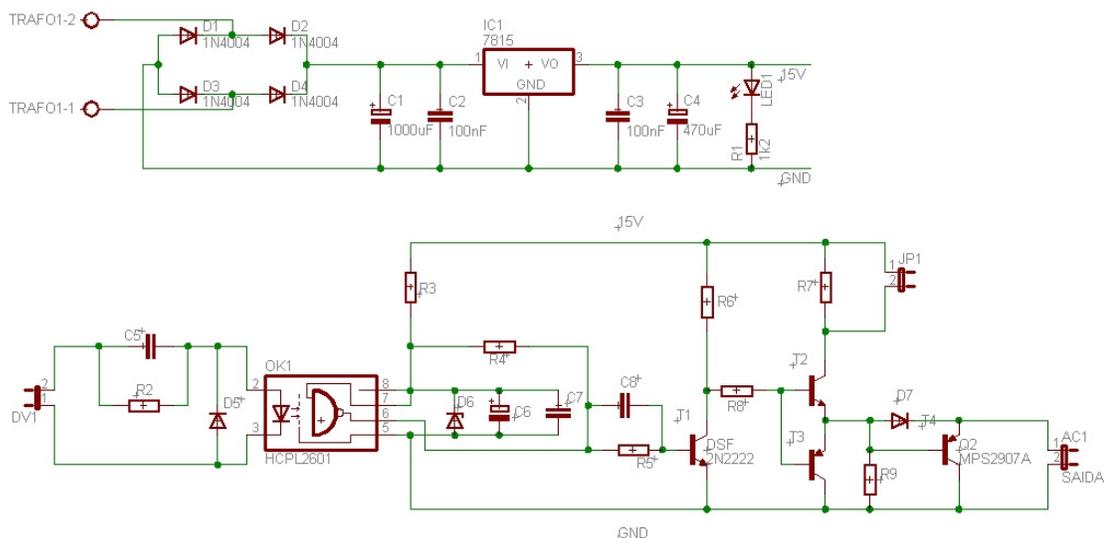


Figura 43 Esquemático do *drive* do inversor

A disposição dos componentes na placa final resultou como o mostrado na Figura 44.



Figura 44 Placa do *drive* do inversor

Para fazer o chaveamento da tensão CC e recriar a alimentação CA na frequência desejada, foi utilizado o transistor IGBT, que se destaca pelas características de baixa queda de tensão no estado de condução e pelo bom desempenho em alta frequência de comutação (POMILIO, 2007).

Sendo assim, o transistor a ser utilizado foi o IRG4BC15UD, que tem características otimizadas para frequências de chaveamento de 10 até 30 kHz (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2001).

Este transistor possui como características máximas absolutas, uma corrente I_C de 14 A à 25°C esta cai para 7,8 A quando a temperatura sobe para 100°C (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2001). Isto é mais do que suficiente para suportar a corrente nominal da bomba de circulação forçada que é de 0,45 A.

Outra característica de seus valores máximos é que este transistor suporta até 600 V entre o coletor e o emissor. É capaz de dissipar 49 W quando em 25°C de temperatura de trabalho ou 19 W à 100°C de temperatura de trabalho. Além disto, este transistor possui também um diodo de antiparalelo para evitar curtos, na Figura 45, estes quatro transistores estão representados pela letra Q (INTERNATIONAL RECTIFIER, 2001).

O esquemático da placa de potência desenvolvido permaneceu praticamente o mesmo em relação à placa de potência desenvolvida por Tiggemann (2008), tendo sido alterado apenas a forma de conexão para os *drives* e para a saída. Assim, o esquemático ficou como o apresentado na Figura 45, onde pode-se ver as chaves semicondutoras Q₁, Q₂, Q₃ e Q₄ que são acionadas aos pares Q₁ e Q₃, Q₂ e Q₄. Esta placa também possui dois filtros capacitivos um na entrada (C₁ e C₂) e outro na saída com os capacitores C₃ e C₄ bem como um filtro indutivo.

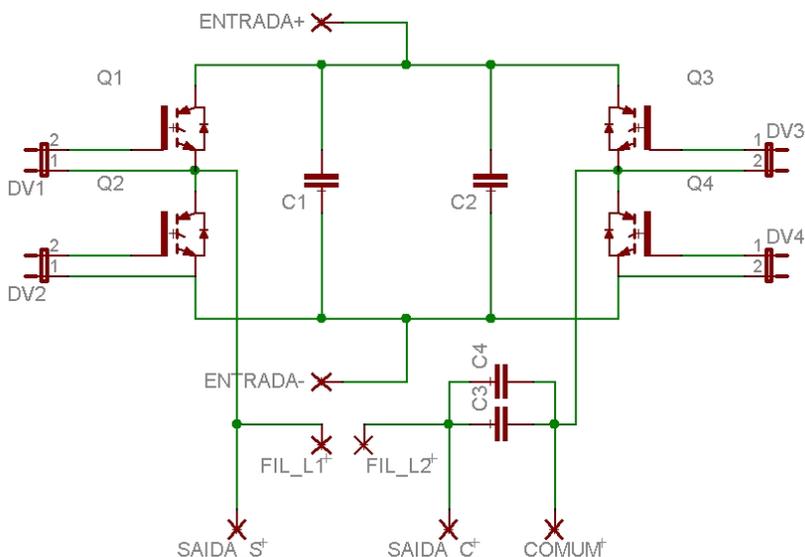


Figura 45 Esquemático da placa de potência do inversor

A disposição dos componentes acima descritos na placa de circuito impresso ficou como mostrado na Figura 46.

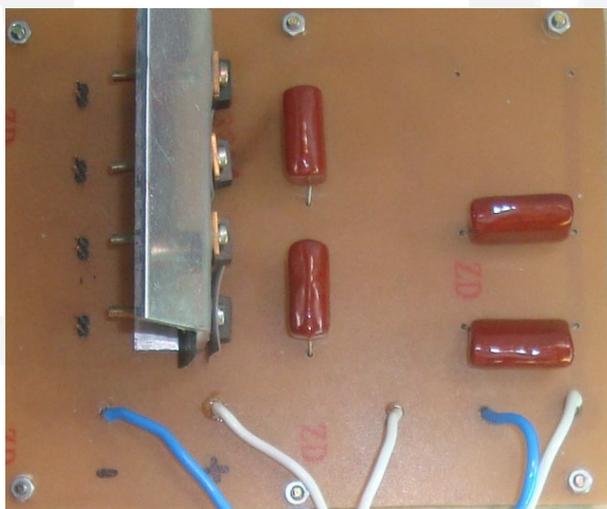


Figura 46 Placa de potência do inversor

A fonte CC (Figura 46) utilizada neste inversor é feita através da retificação direta da tensão da rede elétrica (220 V_{AC}) e logo após esta retificação é feita uma filtragem com quatro capacitores eletrolíticos de $220\ \mu\text{F}$. Desta forma, obtém-se 315 V na saída CC. Deve ser observada a tensão de trabalho dos capacitores e a limitação de corrente dos diodos.

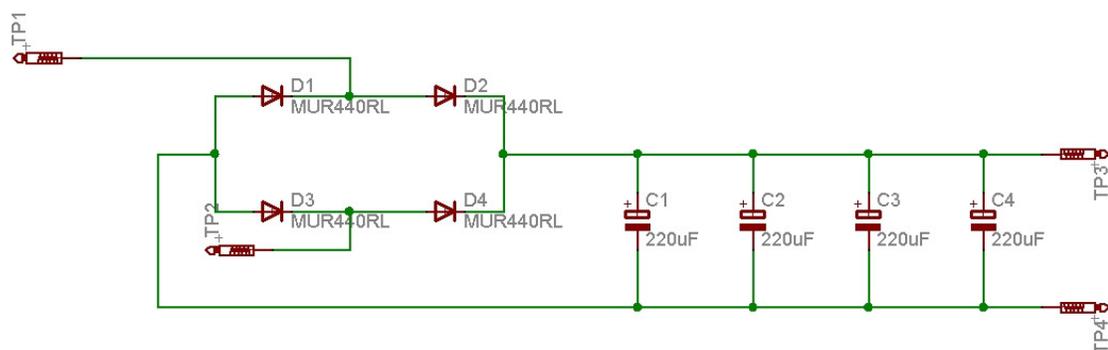


Figura 47 Esquemático da placa retificadora de potência (TIGGEMANN, 2008)

A Figura 48 ilustra a placa desta fonte CC utilizada neste inversor de frequência.



Figura 48 Placa da fonte CC do inversor

5 RESULTADOS

Inicialmente foi feita a monitoração do sistema que estava em funcionamento no laboratório solar. Para tornar padrão, utilizou-se o mesmo intervalo de tempo deste, 5 minutos entre cada aquisição. Com estes dados pode-se chegar a uma tabela que é apresentada no Apêndice A.

Nesta tabela constam o horário de cada aquisição, o valor da vazão em L/min, as temperaturas de entrada e saída dos coletores, temperatura de consumo e o rendimento energético em Joules e Wh.

Pode-se então constatar que no período destas aquisições, conseguiu-se atingir uma média de temperatura de consumo de 39,95°C e um rendimento de 9,46 Wh.

Em um segundo momento, foi realizada a monitoração do sistema com o acionamento da bomba de circulação forçada por picos de vazão, onde a bomba era acionada apenas quando a temperatura de saída dos coletores atingia 5°C a mais que a temperatura de entrada dos coletores solares. Esta bomba era desligada somente quando esta mesma temperatura baixava em relação à temperatura de consumo ou 3°C da temperatura de consumo.

Através deste controle conseguiu-se atingir a temperatura média de consumo de 54,91°C com um rendimento energético de 27,48 Wh.

Ainda em um terceiro momento, foi realizada a monitoração do sistema com o acionamento da bomba de circulação forçada de forma proporcional à intensidade luminosa. Onde esta bomba ficava acionada sempre, dia e noite, mantendo a água sempre circulando.

Este forma controle do acionamento da bomba, proporcionou uma temperatura média de consumo de 57,54°C e um rendimento energético de 35,14 Wh.

Uma comparação gráfica entre as três diferentes formas de atuação no sistema de aquecimento solar fototérmico do laboratório solar da Univates, nos traz o aumento no rendimento do deste sistema, pois as diferentes atuações na forma de acionamento da bomba proporcionou um aumento médio da temperatura de consumo de aproximadamente 15°C. Os gráficos das Figura 49, Figura 50 e Figura 51 apresentam a curva da temperatura de água de consumo do sistema atual do laboratório solar, tendo suas aquisições sido feitas pela placa de controle do objeto

desta proposta em azul, em comparação com um módulo de registro de campo (*Field Logger* - Novus) em rosa.

A Figura 49, mostra o comportamento do sistema perante o acionamento existente no laboratório solar da bomba de circulação forçada, os dados destas coletas pode serem encontrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** no Apêndice A.

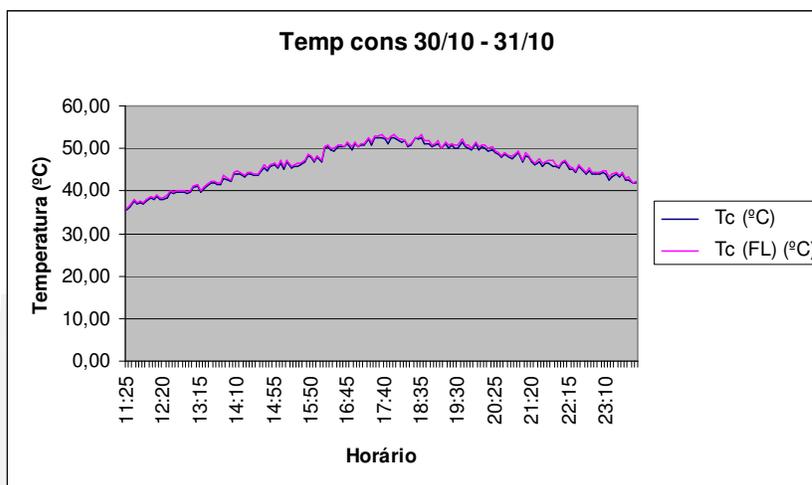


Figura 49 Gráfico temperatura de consumo do sistema inicial do laboratório solar

O gráfico da Figura 50, apresenta a curva da temperatura de água de consumo do sistema quando a bomba teve seu acionamento em picos.

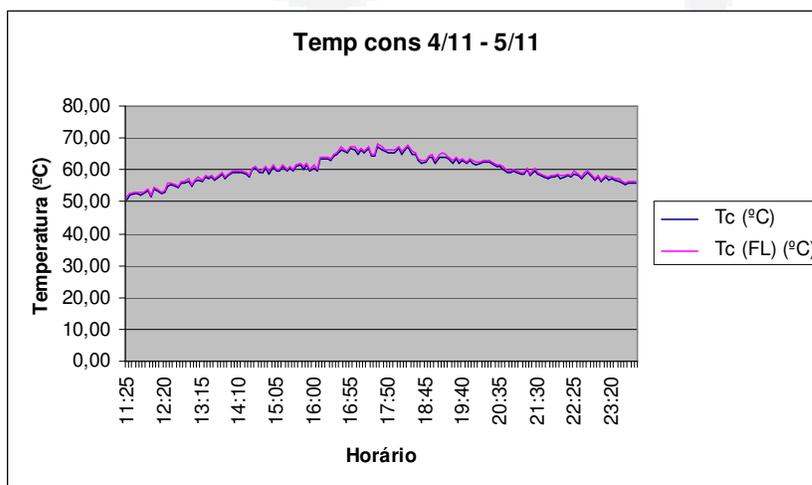


Figura 50 Gráfico temperatura de consumo do sistema quando a bomba tem controle por picos

O gráfico da Figura 51, apresenta a curva da temperatura de água de consumo do sistema quando a bomba teve seu acionamento proporcional direto.

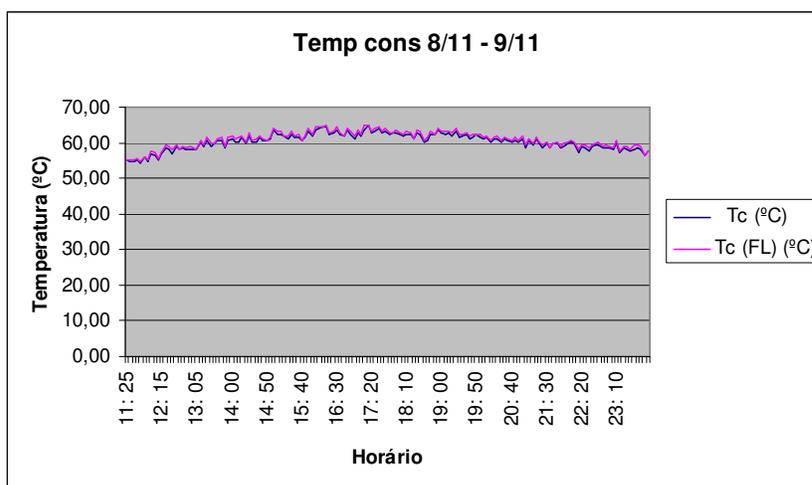


Figura 51 Gráfico temperatura de consumo do sistema quando a bomba tem controle proporcional direto

Este sistema não conseguiu atingir vazões maiores que 20 L/min, devido à limitação física que a bomba de circulação forçada impeliu. O inversor de frequência quando em 100 Hz, proporcionou vazões por volta deste valor, impossibilitando assim de se saber qual seria o resultado quando colocado este sistema em uma vazão maior bem como até qual ponto maior.

Pode-se observar também que mesmo mantendo a bomba de circulação acionada durante a noite, o decremento de temperatura esperado para este período não foi tão acentuado. Isto nos leva a crer que possivelmente há algum problema de isolamento do reservatório térmico, uma vez que a espuma de poliuretano se degrada perdendo suas propriedades de isolamento quando exposta a umidade.

O aumento do rendimento foi de aproximadamente 15 °C o que é bem significativo para este tipo de sistema, pois em comparação com o sistema inicial que possuía uma temperatura máxima de aproximadamente 40 °C houve então um aumento de 37,5%.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema que foi capaz de gerir as informações da planta do laboratório solar da Univates, como temperaturas, vazão e agregando a luminosidade, bem como seus acionamentos, os quais, destas novas formas apresentadas, proporcionaram um melhor aproveitamento energético.

Durante a implementação deste trabalho pode-se aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso e ainda aprofundá-los para o melhor desenvolvimento das placas de circuito impresso, o que foi fundamental para o êxito deste trabalho.

Pode-se concluir que os objetivos iniciais de aumento de rendimento e confiabilidade nas medidas adquiridas foram alcançados, demonstrando a validade, finalidade e funcionalidade do projeto.

Através dos gráficos apresentados na sessão de resultados, pode-se comprovar que houve um aumento do rendimento no sistema, que resultou em uma energia média até três vezes maior que a situação inicial do sistema implementado por Goerck (2008) atingiu. Isto provocou um aumento também na temperatura média de consumo que ficou nas proximidades de 15°C a mais.

Um fato que deve ser levado em consideração quando se fala sobre o rendimento energético deste sistema, é o de que a bomba no acionamento direto e proporcional está sempre provendo o sistema de aquecimento de alguma vazão. Como para o acionamento atual e para o acionamento por picos existem momentos os quais a bomba de circulação forçada está desligada isto comete em um rendimento zero naquele instante. Assim, se forem considerados somente os momentos em que houver vazão, o rendimento médio do sistema inicial do laboratório solar sobe para 20,87 Wh e o acionamento por picos sobe para 56,59 Wh em comparação com os 35,14 Wh.

Isto se deve, pois a vazão é diretamente proporcional ao rendimento energético, assim, o acionamento por picos se utiliza de uma vazão máxima nestes momentos tendo um valor sempre mais elevado, porém, por espaços de tempo mais curtos.

Com isso pode-se dizer que o sistema cumpriu com os objetivos iniciais promovendo o aumento do rendimento e monitoração das variáveis necessárias para tanto.

REFERÊNCIAS

- AIP. **Journal of Applied Physics**. 1964 [s. l.]
- ABB. **The 4 Biggest Mistakes in Instrumentation and how to Avoid Them**. 2007, 7 p. [s. l.].
- ANALOG DEVICES. **Next Generation OP07 Ultralow Offset Voltage Operational Amplifier**: product datasheet. 2002. 16 p. Disponível em: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/OP77.pdf>
- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**. 2ª ed. São Paulo. Ed. Pearson Hall, 2000. 479 p.
- BOLTON, W. **Instrumentation and Control Systems**. Ed. Elsevier Science & Technology Books, 2004. 344 p.
- BURR-BROWN. **Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier**: product datasheet. 1994. 15 p. Disponível em: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opt101.pdf>>
- CLASSOL, **Controlador Lógico para aquecimento de piscinas**: product datasheet, 2008. 4 p. Disponível em: <<http://www.3a.ind.br/pdf/m019.pdf>>. Acesso em 13 de março de 2010.
- DIGI-KEY, **OPT101**. Ano 1998. Disponível em: <<http://media.digikey.com/photos/Texas%20Instr%20Photos/OPT101P-J.jpg>>. Acesso em: 25 de abril de 2010.
- DIY TRADE, **Super heat conduction pipe**. Ano 2008. Disponível em: <http://www.diytrade.com/china/4/products/4880737/Super_Heat_Conduction_Pipe.html>. Acesso em: 14 de março de 2010.
- DUFFIE, J. A. BECKMANN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2ª ed. New York. Ed. John Willey & Sons, 1991. 919 p.
- ENERTRON. **Heat Pipe Selection**. 2001, 6p. Disponível em: <<http://www.enertron-inc.com/enertron-resources/PDF/How-to-select-a-heat-pipe.pdf>>. Acesso em 15 de maio de 2010.
- FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensors Physics, Designs and Applications**. 3ª ed. New York. Ed. Springer-Verlag, 2004. 589 p.
- FRAINDENRAICH, N. **Tecnologia solar no Brasil. Os próximos 20 anos**. Universidade Federal de Pernambuco. 2004. 11 p.

GEMS SENSOR, **RFO-RFA**: Product datasheet. 200X. p. 66. Disponível em: <http://www.gemssensors.com/uploadedFiles/Literature/UK_PDFs/RFO-RFA.pdf>. Acesso em 15 de março de 2010.

GOERCK, M. **Determinação do potencial energético de um coletor solar fototérmico na região do Vale do Taquari-RS Brasil**. 93 p. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Desenvolvimento (PPGAD), Centro Universitário Univates, Lajeado, 2008.

GOLDEMBERG, J.; LUCON. O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3ª ed. São Paulo. Ed. da Universidade de São Paulo, 2008. 398 p.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da física**. 6ª ed. Rio de Janeiro. Ed. LTC, 2002. 228 p.

HARLAN, B. Solar Water Heating Systems Designs. In: **Backwoods Home Magazine**, nº65, 2000. p. 44-51.

MICROCHIP. **PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet**. Product data sheet. 2006. 430 p. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>

MICROCHIP. **24AA512/24LC512/24FC512**. Product data sheet. 2009. 32 p. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22021F.pdf>>

INTERNATIONAL RECTIFIER. **Insulated Gate Bipolar Transistor with Ultrafast Soft Recovery Diode**: Product data sheet. 2001. 10 p. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/68638/IRF/IRG4BC15UD.html>>

JANNUZZI, G. D. E. **Uma Avaliação das Atividades Recentes de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Renovável no Brasil**. Universidade Estadual de Campinas, 2003. 15 p.

JUNIOR, C. B.; CARNEIRO, N. E. **Controle de Aquecimento Solar para Piscinas**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008. 30 p.

KESTER, W.; BRYANT, J.; JUNG, W. G.; WURGER, S.; KITCHIN C. Sensor Signal Conditioning. In: **Op Amp Applications**. United States: Analog Devices, 2002. p. 4.1-4.92. ISBN 0-916550-26-5.

LaMonica, M. **Green Tech – Solar thermal seeks U.S. breakthrough**. 29 de julho de 2010. Disponível em: <http://news.cnet.com/8301-11128_3-20012060-54.html>. Acesso em: 10 de novembro de 2010.

LEI nº 14.459 de julho de 2007, São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=04072007L%20144590000>. Acesso: 20 de maio de 2010.

MORRIS, A. S. **Measurements and Instrumentation Principles**. 3ª ed. Auckland. Ed. Butterworth Heinemann, 2001. 475 p.

MOURAO, R. R. de F. **Sol e Energia no Terceiro Milênio**. Ed. Scipione, São Paulo, 2002. 126 p.

MICROCHIP, **25AA512/25LC512**: product datasheet. 2007, 32 p. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/195347/MICROCHIP/25AA512.html>>. Acesso em: 20 de março de 2010.

MICROCHIP, **PIC18F2455/2550/4455/4550**: product datasheet. 2006, 430 p. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>. Acesso em: 20 de março de 2010.

MOTOROLA, **6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output**: product datasheet. 1995, 6 p. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5040/MOTOROLA/MOC3022.html>>

NATIONAL SEMICONDUCTOR, **Frequency to Voltage Converter**: product datasheet. 2003. 21 p. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8822/NSC/LM2907N.html>>. Acesso em 28 de abril de 2010.

NOVUS, **Registrador Field Logger**: product datasheet. 2008. 8 p. Disponível em: <http://www.novusautomation.com/downloads/Arquivos/5000950_v22x_b_manual_fieldlogger_portuguese.pdf>. Acesso em 17 de março de 2010.

NOVUS, **Termorresistências Pt100**: product datasheet. 2008, 3 p. Disponível em: <http://www.novusautomation.com/downloads/Arquivos/folheto_pt100.pdf>. Acesso em 17 de março de 2010.

OLIVEIRA, W. F.; DAL PAI, A. **Análise do consumo de energia elétrica em determinadas regiões da cidade de Botucatu**. Tékhne ε Lógos, Botucatu, São Paulo, v.1, n.2, fev. 2010.

PALLÀS-ARENY, R.; WEBSTER, J. G. **Sensor and Signal Conditioning**. 2ª ed. New York. Ed. John Wiley & Sons, 2001. 637 p.

PEREIRA, E. M. D.; DUARTE, L. O. M.; PEREIRA, L. T.; FARIA, C. F. da C. Energia Solar Térmica. In TOLMASQUIM, M. T. (org), **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2003. p. 239-280.

PEREIRA, R. C., SHIOTA, R. T., MELLO, S. F., JÚNIOR, V. A. **Eficiência térmica de coletores solares de baixo custo – CSBC**. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. 2006. p 9607-9617.

POMILIO, J. A.: **Eletrônica de Potência**, 3a Ed. – Campinas : Material didático da Pós-graduação – UNICAMP, 2007.

SAVICKI, D. L. **Análise numérica tridimensional e investigação experimental do comportamento térmico e hidrodinâmico de reservatórios térmicos cilíndricos**. 222 p. Dissertação (doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SWERA. Disponível em: <www.swera.unep.net>. Acesso em abril de 2010.

TERROSO, A. R. **Protocolos**. Ano 2004. Disponível em: <<http://www.ee.pucrs.br/~terroso/html/protocolos.html>>. Acesso em: 10 de setembro de 2010.

TIGGEMANN, H. **Análise e desenvolvimento de um inversor monofásico de baixa potência aplicado a sistemas de transporte**. 88 p. Dissertação (Bacharelado em engenharia), Centro Universitário Univates, Lajeado, 2008.

TIRADENTES, A. A. R. **Uso da energia solar para geração de eletricidade e para aquecimento de água**. 54 f. Monografia (Especialista em energia solar) - Pós-Graduação Lato Sensu em Fontes Alternativas de Energia. Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2007.

TRANSSSEN, **Transsen Aquecedor Solar**. Product datasheet, 2006, 18 p. [s. l.].

WILSON, J. **Sensor Technology Handbook**. 1ª ed. New York. Ed. Elsevier, 2005. 691 p.