

## CAPÍTULO 4

# Descrição dos circuitos de controle

---

### 4.1 Introdução

Discutiu-se nos capítulos anteriores, o aproveitamento de energias alternativas, técnicas de condicionamento e armazenamento de energia. Tratamos aqui, do emprego de dispositivos de eletrônica analógica e digital arranjados de maneira a monitorar e otimizar a geração de múltiplas fontes alternativas.

### 4.2 O Gerador Eólico

O gerador eólico utilizado como referência na simulação consiste de um gerador assíncrono trifásico, marca Wind Baron 750 XLM, cuja potência nominal é 750 Watts e tensão de 24 Volts alternados, auto-excitado por um banco de capacitores ligados em estrela na saída do gerador.

Para simulação via software, conforme figura 4.1, foi estabelecido um modelo com as características nominais do gerador utilizado.

#### 4.2.1 – Controle do Gerador Eólico

Para simulação via software, foi montado um modelo de controle, conforme a figura 4.2, onde por realimentação de corrente, a partir de um valor de referência, estabelece-se a modulação de chaveamento do semicondutor, de modo a controlar a corrente drenada.

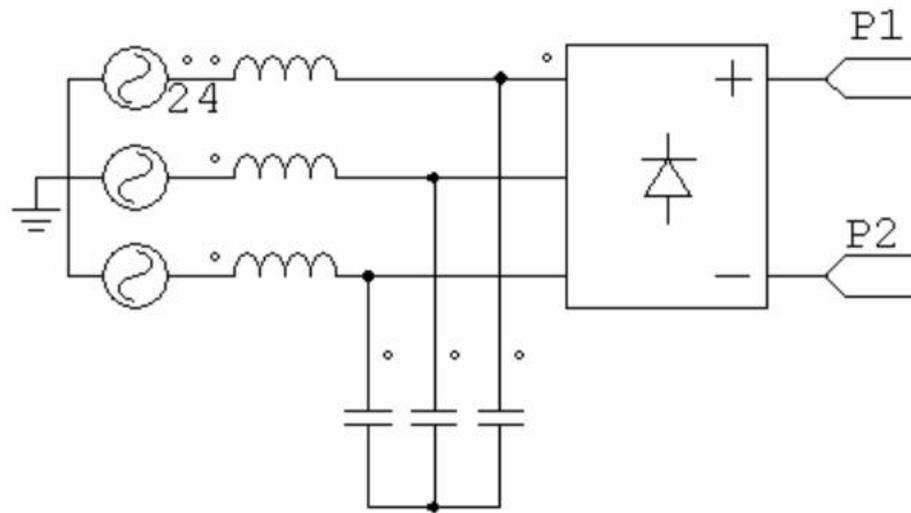


Figura 4.1: Modelo do Gerador Eólico

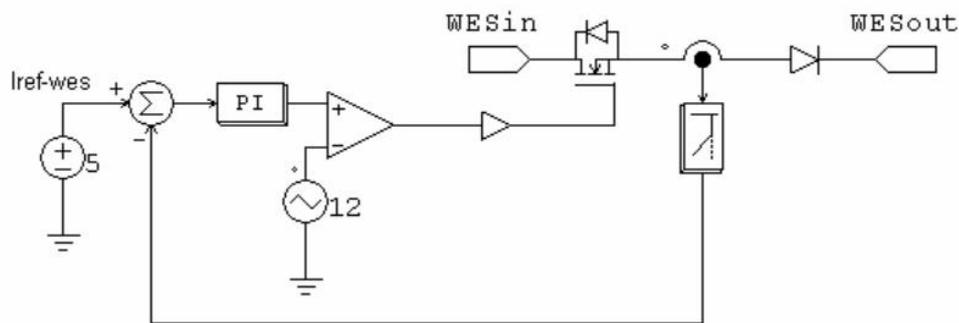


Figura 4.2: Modelo do controle do gerador eólico

A tensão e frequência produzidas pelo gerador não são controladas nesta etapa do processo. Inicialmente o sinal de saída é convertido para corrente contínua, através de uma ponte retificadora. A seguir, por intermédio de dois sensores, um de corrente e outro de tensão, esses valores são convertidos em sinais digitais pelo próprio microcontrolador que, através de um algoritmo específico, calcula a potência média da amostragem e determina qual o maior valor de corrente possível de ser fornecida ao barramento. Esta corrente de máxima potência é calculada pelo HCC [4] é considerada neste modelamento como pré-estabelecida. Através de um controle por largura de pulsos a corrente é injetada no barramento comum às fontes, para o valor de máxima potência gerada nas condições presentes da fonte primária [2], através de um MOSFET chaveado.

Para exemplificar o funcionamento do modelo, utilizou-se uma corrente de referência igual a 5 A, na simulação, para a qual pode-se perceber na figura 4.3., que o circuito ajusta-se até chegar ao valor demandado pela carga.

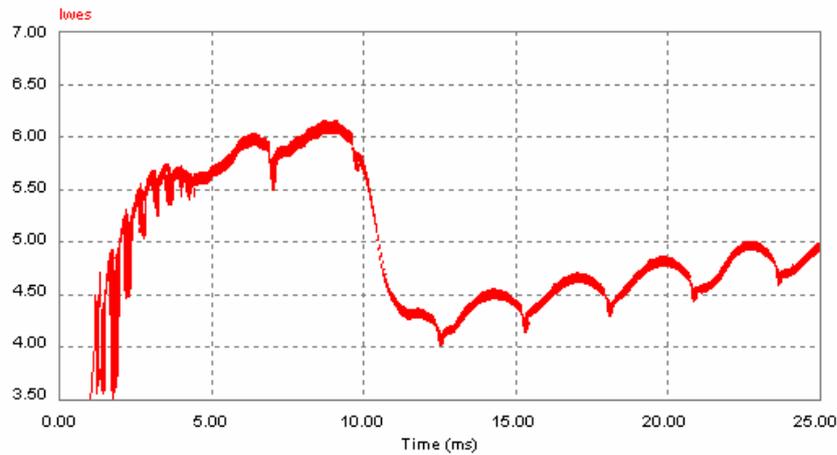


Figura 4.3: Simulação do controle de corrente do gerador eólico

#### 4.2.2 – Aquisição dos Sinais de Tensão e Corrente

O valor de tensão do gerador é obtido por intermédio de um divisor de tensão resistivo, mostrado na figura 4.4, ajustado de modo que a tensão que chega ao microcontrolador não ultrapasse 5 volts, que é o valor máximo admitido pelo conversor analógico/digital do microcontrolador PIC18F452.

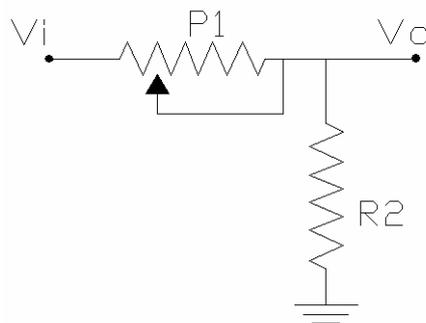


Figura 4.4: Sensor de tensão

Os sinais de corrente são medidos através de um dispositivo de efeito Hall, de dimensões pequenas e isolamento elétrico de 4 kV, marca SECON, modelo SECOHR CI-50, que permite correntes de até 50 A, com razão de saída 1:1000 e precisão 1% . O ganho do

circuito sensor é definido de modo que o valor de saída não ultrapasse 5V, que é o limite máximo de entrada do conversor analógico-digital interno ao microcontrolador, o que poderia acarretar funcionamento inadequado e até mesmo a queima do mesmo. Esse circuito é mostrado na figura 4.5.

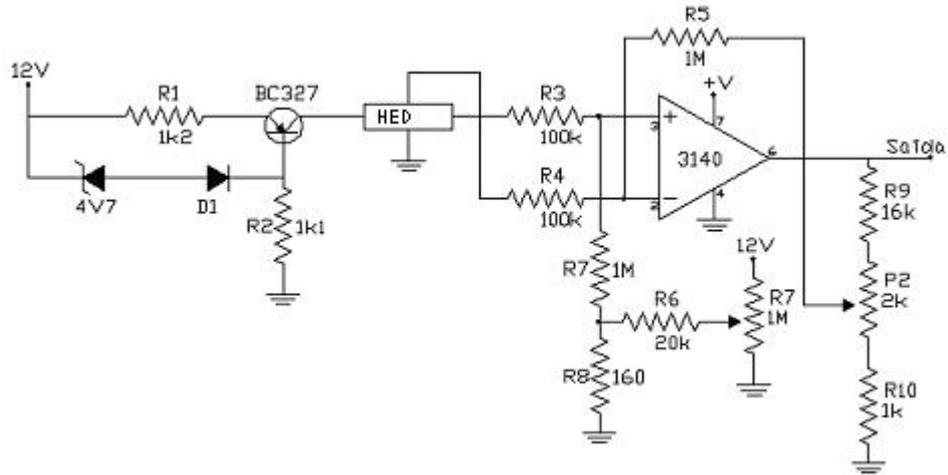


Figura 4.5: Sensor de corrente

O sinal de saída tem suas distorções minimizadas através de um filtro de segunda ordem, mostrado na figura 4.6, cuja frequência de corte é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (4.1)$$

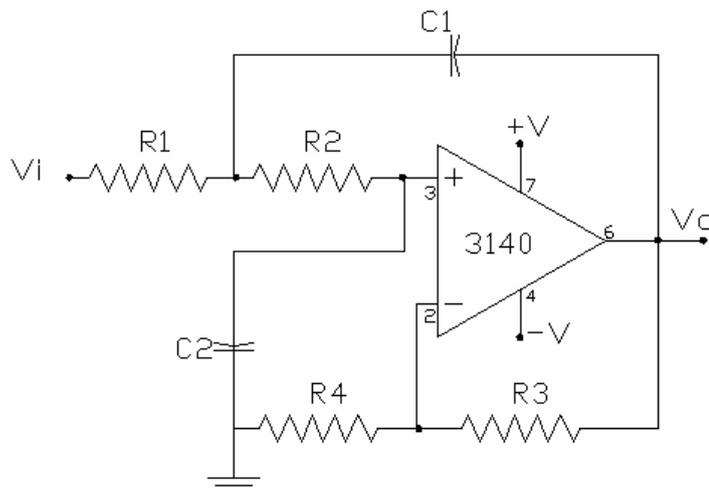


Figura 4.6: Filtro Passa-Baixas

### 4.3 O Gerador Fotovoltaico

Foram utilizados quatro módulos fotovoltaicos em paralelo da marca Siemens, cuja tensão de saída é 24 Volts e potência 75 Watts cada um, totalizando 300W/24V.

Da mesma forma que o gerador eólico, foi estabelecido um modelo de gerador fotovoltaico para simulação via software, como mostrado na figura 4.7, onde se utilizou uma única fonte de corrente representando o somatório das várias fontes em série, que são as células que compõe os módulos fotovoltaicos.

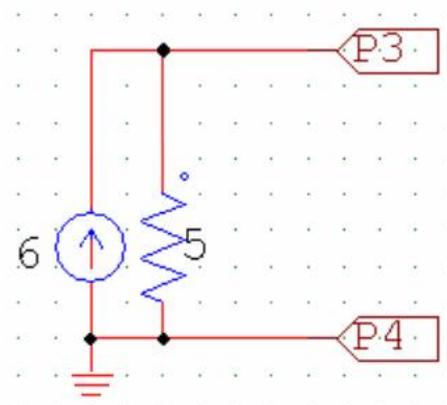


Figura 4.7: Representação dos módulos fotovoltaicos

#### 4.3.1 – O controle do gerador fotovoltaico

Por intermédio de dois sensores, um de tensão e outro de corrente, conforme figuras 4.4 e 4.5., respectivamente. Após a filtragem, os sinais são convertidos em sinais digitais pelos conversores analógicos-digitais internos do microcontrolador. O algoritmo HCC [4], de controle, calcula corrente relativa à potência máxima da amostragem a partir dos valores de tensão e corrente para estabelecer a corrente a ser fornecida ao barramento. Da mesma forma que o gerador eólico, o sinal de saída é modulado através do chaveamento de um único MOSFET de potência e injetado no barramento comum a todas as fontes.

Os sensores de corrente e de tensão, bem como o filtro passa-baixas, são semelhantes ao circuito de aquisição de sinais utilizado pelo gerador eólico.

Para simulação, conforme figura 4.8, o modelo de controle do gerador fotovoltaico utiliza também uma realimentação de corrente, onde o sistema se ajustará até conseguir a corrente de máxima potência, que foi calculada pelo HCC.

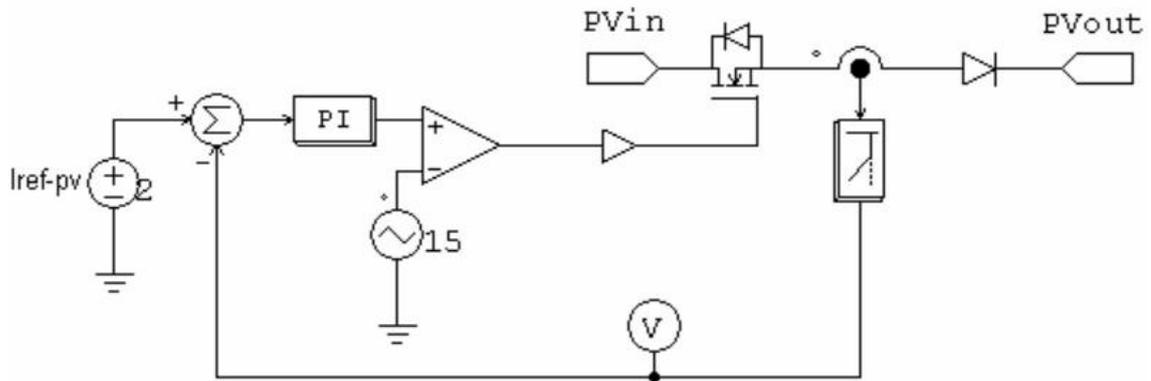


Figura 4.8: Circuito de controle do gerador fotovoltaico.

#### 4.4 O Banco de Baterias

O banco de baterias é determinado pelas características de consumo da carga. Necessita de regulação de tensão, pois quaisquer excessos de carga ou subcarga provocam danos à vida útil das baterias.

A capacidade de uma bateria pode ser calculada por diversos métodos, um deles é o método Hoxie [20], que utiliza curvas de descargas que variam para cada tipo de bateria e que estão mostradas na figura 4.9. O método divide o tempo de descarga das baterias em períodos, que são distinguidos pela corrente de descarga. Isso determinará um índice K que determinará a capacidade da bateria pela fórmula 4.2.

$$C = K_1 I_1 + K_2 (I_2 - I_1) + K_3 (I_3 - I_2) + \dots + K_n (I_n - I_{n-1}) \quad (4.2)$$

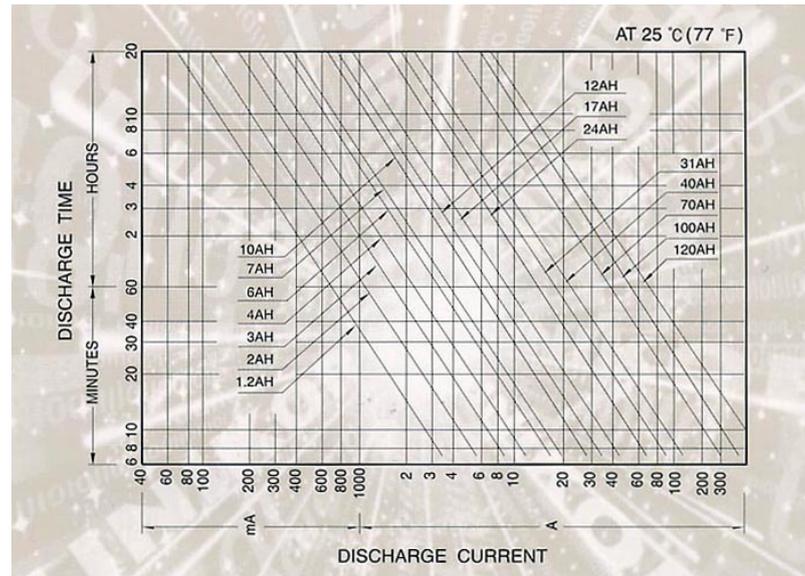


Figura 4.9: Curvas de descarga de baterias

Conforme mostrado na figura 4.10 para simulação, o banco de baterias foi substituído por um capacitor, que tem comportamento de carga e descarga similar às baterias, associadas a um resistor em série, que representa a resistência interna do banco de baterias. Esse modelo simplificado é citado por RINKIEWICZ [12], nesta situação, mostra-se adequado por não envolver um estudo mais profundo, pois o objetivo da dissertação não é estudar baterias.



Figura 4.10: Representação do banco de baterias

O circuito controlador do banco de baterias possui o sensor de tensão que envia o sinal ao conversor analógico-digital do microcontrolador.

Por intermédio do software de controle, através dos valores de corrente dos módulos geradores, estabelece-se um processo de controle de corrente de carga e descarga com o propósito proteção contra correntes excessivas a fim de garantir a vida útil da bateria [14].

Essa corrente de carga e/ou descarga não deve exceder 1/10 da capacidade do banco de baterias em  $Ah$ .

Para simulação, conforme figura 4.11, utilizou-se um comparador tipo janela, de modo a manter a tensão entre 11,5V e 15V, que são as tensões máxima e mínima admissíveis. Excedidos esses limites, o sistema desliga o banco de baterias para não danificá-las. Na ausência de energia das fontes primárias, eólica e solar, o banco de baterias fornece corrente ao barramento principal, tendo-se o cuidado de limitar a corrente de descarga.

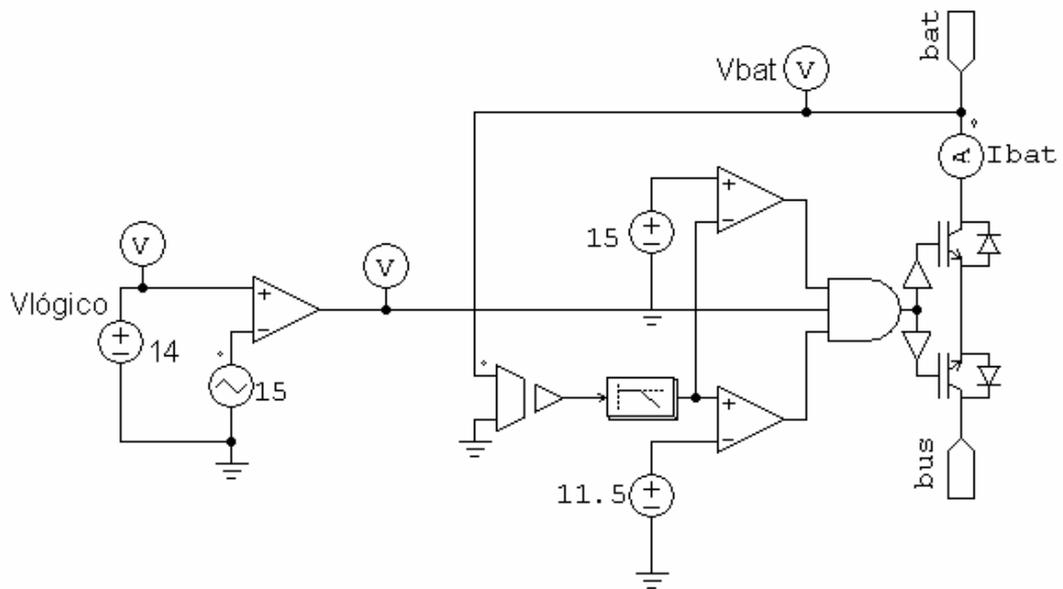


Figura 4.11: Modelo do controle de carga e descarga das baterias

## 4.5 Controle da Tensão na Carga Principal

A partir da fonte de corrente resultante das contribuições individuais de potência maximizadas pelo HCC [4], o controle da tensão na carga principal é feito por intermédio de uma outra carga secundária em paralelo. Esta carga secundária ajusta o valor de tensão na carga principal  $V_o = I(R_1 + R_2)$  pela modulação do valor eficaz da carga secundária. Um sensor informa ao programa controlador o valor de tensão na carga principal e este, por sua vez, estabelece uma comparação com o valor de referência. Por modulação de largura de pulsos, é feito o chaveamento do MOSFET conectado em série com a carga secundária. Essa carga secundária tem seu valor ajustado desde um valor muito grande (circuito praticamente

aberto), até seu valor nominal de resistência, como forma de regular a tensão na carga principal.

Para simulação, utilizou-se o circuito mostrado na figura 4.12.

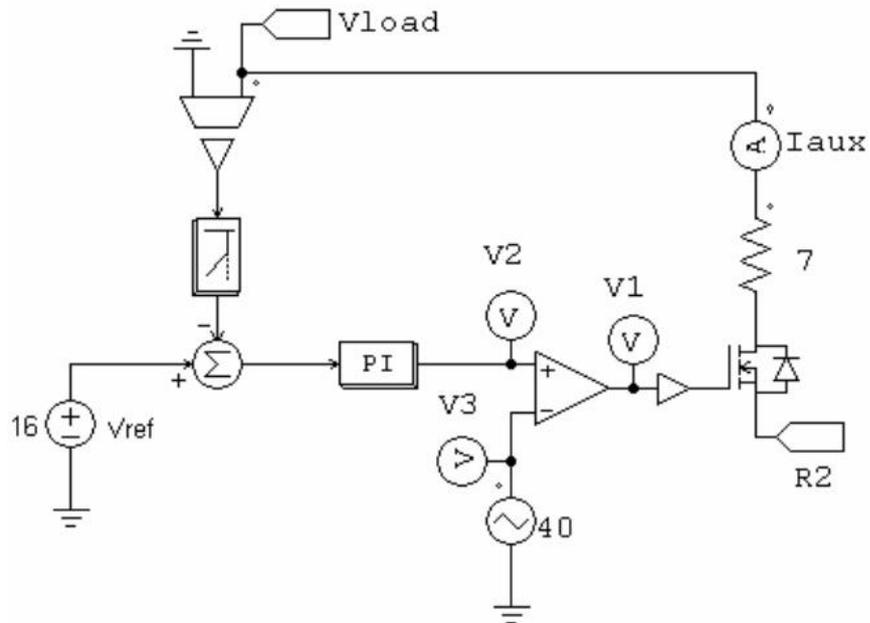


Figura 4.12: Circuito de controle de tensão na carga principal

A figura 4.13 mostra um resultado da simulação para um valor de referência de tensão, mostrando a convergência estabelecida pelo controle.

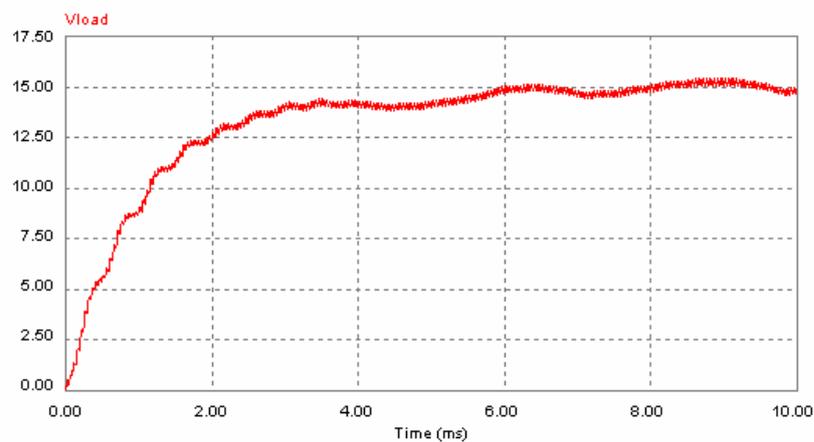


Figura 4.13: Simulação de ajuste da tensão da carga

## 4.6 O Algoritmo HCC “Hill Climbing Control”

Para determinar o ponto de máxima potência gerada pelas fontes, utilizamos o algoritmo “Hill Climbing Control”, que é um método de inteligência artificial [4] onde, por intermédio de sucessivos incrementos ou decrementos na variável de controle, conseguimos, deste modo, forçar que a potência produzida pelo módulo gerador seja máxima. Necessita-se para isso, um adequado fluxo de corrente.

Ultrapassado o ponto máximo, esse passo terá seu valor dividido de modo a suavizar as variações na convergência. Esse processo está mostrado na figura 4.14.

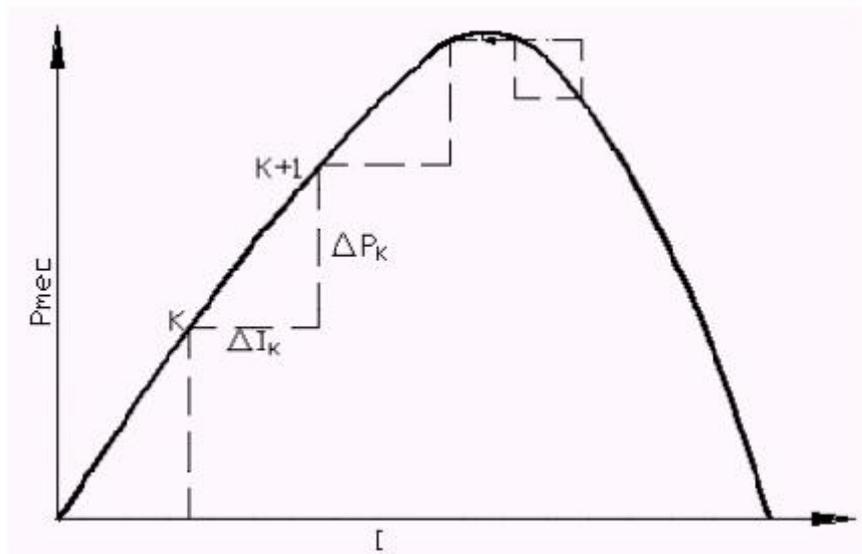


Figura 4.14: Representação do algoritmo “Hill Climbing Control”

## 4.7 Microcontroladores Utilizados

Para efetuar o controle da geração de energia, armazenamento em baterias e também a regulação de tensão na carga principal, utilizamos dois microcontroladores PIC18F452, da Microchip. Essa escolha deu-se em função da necessidade de se garantir com isso robustez, modularidade e rapidez aos processos. Podemos destacar como principais características do PIC 18F452:

- Frequência de Operação: 40MHz
- Memória de Programa: 32Kbytes

- Memória de Dados: 1536 bytes
- Portas I/O: A,B,C,D(0a7),E(0a1)
- Timers: 4
- Módulos Capture/Compare e PWM: 2
- Comunicação Serial: USART
- Módulo A/D 10 Bits: 8

Detalhes específicos do microcontrolador são mostrados nos anexos I, II e IV.

O número de microcontroladores utilizados deu-se em função da necessidade de se definir dois processos distintos: a geração e a utilização da energia. Com isso, procurou-se dar versatilidade ao sistema, pois posteriormente, com muita facilidade poderíamos incluir no processo novas fontes de geração de energia. Nos apêndices I, II e III temos, respectivamente, os diagramas de blocos dos processos acima citados.

Um dos microcontroladores monitora o controle das fontes de geração de energia, enquanto o outro controla a carga das baterias e a tensão da carga principal.

#### **4.8 Fluxograma de Controle dos Módulos Geradores**

O fluxograma mostrado na figura 4.15 estabelece a seqüência de operação do software de controle dos módulos geradores, implementado em um microcontrolador dedicado ao controle da geração de energia e obedecendo ao algoritmo “Hill Climbing Control” para buscar o ponto de máxima potência gerada em cada uma das fontes envolvidas no processo. Como utilizamos uma fonte de geração eólica e uma fonte solar, o algoritmo alterna o ajuste das fontes de forma seqüencial, isto é: promove incrementos ou decrementos na razão cíclica da modulação de corrente primeiro em uma fonte, depois na outra, de acordo com os valores de potência lidos, de modo a buscar o ponto de máxima potência de geração em cada uma das fontes.

Os recursos de comunicação serial implementados no PIC18F452 são utilizados para enviar os dados de tensão e corrente produzidos pelas respectivas fontes a um computador que pode ser conectado no módulo principal à qualquer momento. Utiliza-se para isso um software executável desenvolvido na plataforma LABVIEW, da National Instruments, de modo que a qualquer momento se possa efetuar uma análise da qualidade dos níveis de potência produzidos a cada ciclo de leitura dos valores.

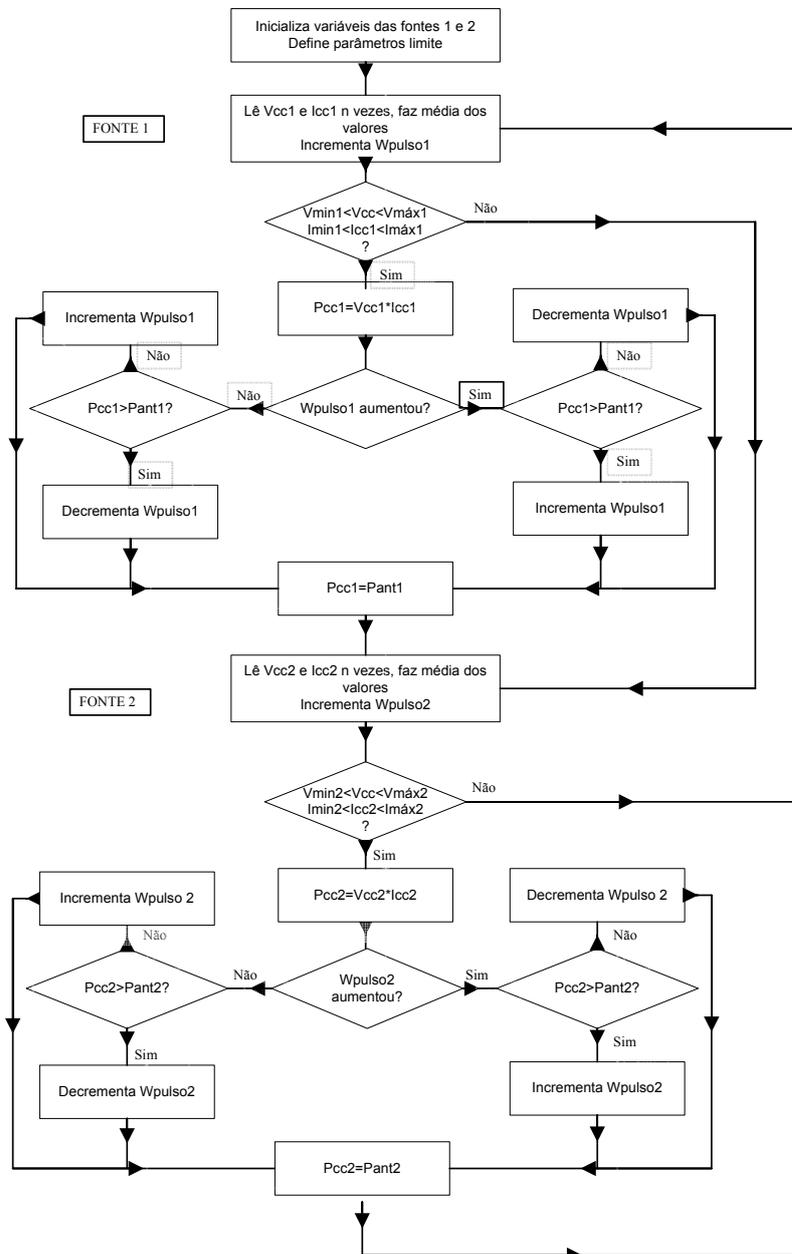


Figura 4.15 - Fluxograma de controle dos módulos geradores

## 4.9 Controle do Banco de Baterias e Tensão na Carga Principal

O controle do banco de baterias para armazenar e manter disponibilidade de energia nos momentos em que as fontes não conseguem produzir potência suficiente, em função da falta de sol ou vento, é baseado nos valores nominais de segurança e durabilidade que

caracterizam as baterias chumbo-ácido, que foram escolhidas pelo seu baixo custo e facilidade de manutenção.

O controle da carga e descarga das baterias baseia-se nos limites mínimo e máximo de tensão e corrente admissíveis. Sequencialmente, o software mostrado no anexo 4.1 monitora o valor da tensão nominal da carga, promovendo o ajuste através de incrementos ou decrementos de corrente através do ramo de circuito paralelo que desvia a corrente para uma carga auxiliar. Esse diagrama é mostrado na figura 4.16.

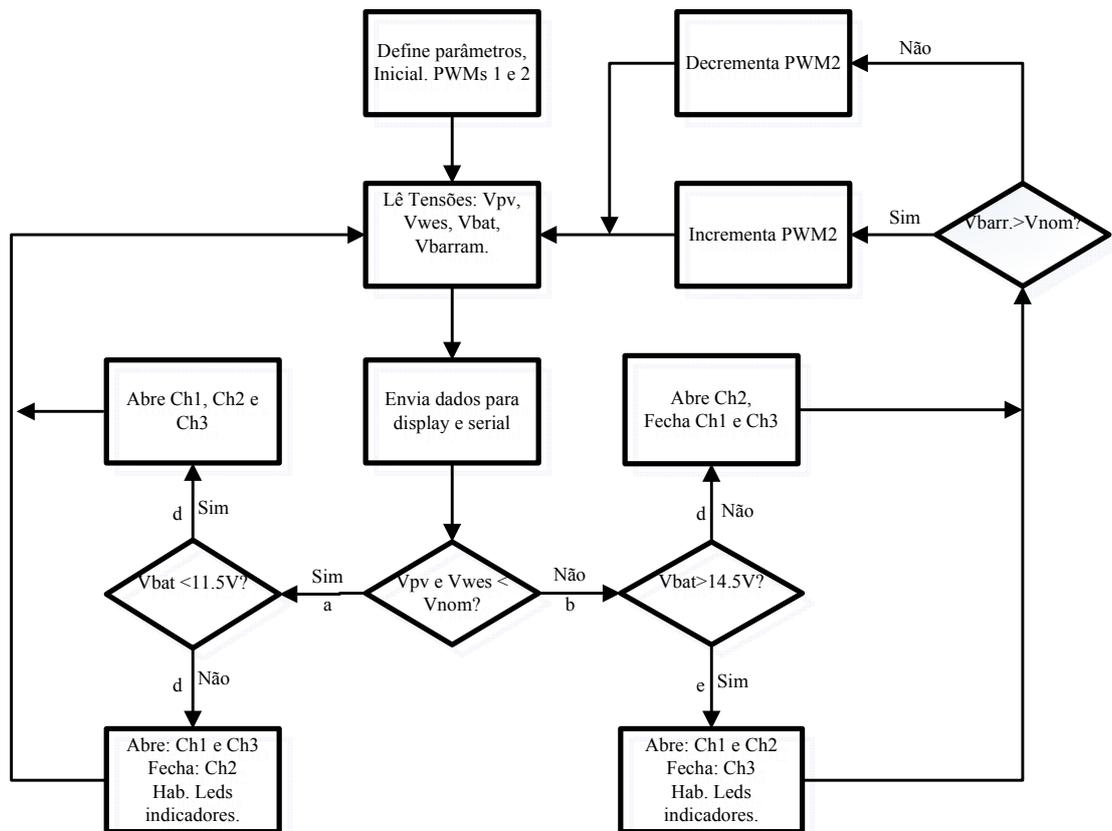


Figura 4.16 Fluxograma de controle das baterias e tensão da carga

O controle da tensão da carga principal só acontece mediante o pleno funcionamento da geração, pelo menos por uma das fontes. Como já foi citado anteriormente, esse controle acontece pelo dreno do excesso de corrente através da carga auxiliar. No caso do suprimento de energia estar sendo fornecido pelo banco de baterias, na ausência da energia das fontes primárias, a carga auxiliar é desligada do sistema. Somente quando os valores de tensão das fontes chegarem novamente a um valor mínimo igual à tensão nominal da carga principal é que as baterias voltam a ser carregadas e a regulagem da tensão volta a acontecer.

Como o módulo de controle presta-se a qualquer aplicação de controle de suprimento e a capacidade do banco de baterias é função da autonomia necessária ao tipo de sistema alimentado pelas fontes alternativas, esses critérios não foram especificados nesta dissertação.

#### 4.10 Modelagem do Conversor

Para operação com tensão regulada, foi utilizado um conversor de tensão chaveado conforme mostrado na figura 4.17. Uma chave modulada, representada pelo transistor  $Q_1$  tem seus tempos de condução e corte ( $t_{ON}$ ) e ( $t_{OFF}$ ) respectivamente, acionado por um circuito modulador de largura de pulsos. Quando existe condução, transfere-se energia da fonte  $V_{IN}$  para a carga, por intermédio do indutor  $L_1$ . Nesta condição, o diodo  $D_1$  está polarizado reversamente e o capacitor  $C_o$  é carregado. Quando o transistor é desligado, o indutor força a condução do diodo e a corrente de carga  $I_o$  passa por  $L_1$ .

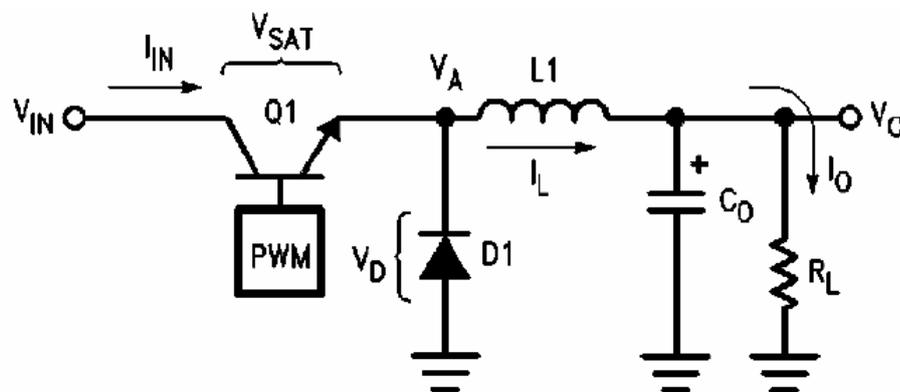


Figura. 4.17..Circuito do conversor Buck

Na figura 4.18 temos as formas de onda de tensão  $V_A$  e corrente  $I_L$  no indutor  $L_1$ . A tensão  $V_A$  é filtrada pelo filtro constituído por  $L_1$ ,  $C_o$  e pelo resistor  $R_L$ , garantindo uma tensão contínua, com baixo *ripple* na saída.

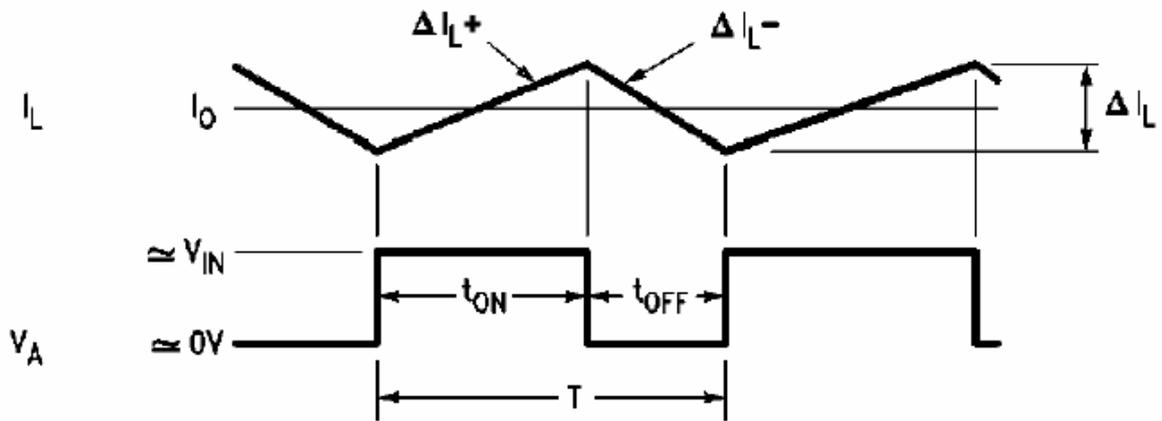


Figura 4.18 Formas de onda de corrente no indutor e tensão de entrada do filtro LC

Considerando-se que a variação  $\Delta I_L$  seja simétrica, podemos escrever que:

durante  $t_{ON}$

$$V_L = V_{IN} - V_O = L_1 \frac{\Delta I_L}{t_{ON}} \quad (4.3)$$

durante  $t_{OFF}$

$$V_L = -V_O = L_1 \frac{\Delta I_L}{t_{OFF}} \quad (4.4)$$

Substituindo-se  $\Delta I_L$  dado pela equação em  $t_{ON}$  na equação de  $t_{OFF}$ , temos:

$$V_O = V_{IN} \frac{t_{ON}}{t_{OFF} - t_{ON}} = V_{IN} \frac{t_{ON}}{T} \quad (4.5)$$

essa equação relaciona a tensão de saída  $V_O$  com a razão cíclica  $(\frac{t_{ON}}{T})$ , e por intermédio disso podemos escrever que:

$$t_{ON} + t_{OFF} = T = \frac{\Delta I_L L_1}{V_{IN} - V_O} + \frac{\Delta I_L L_1}{V_O} \quad (4.6)$$

Desta equação, podemos definir o valor do indutor  $L_1$ :

$$L_1 = \frac{V_o(V_{IN} - V_o)}{\Delta I_L V_{IN} f} \quad (4.7)$$

onde  $f$  é a frequência de comutação da chave  $Q_1$ .

A corrente no indutor é a soma da corrente de carga com a corrente do capacitor, conforme podemos perceber na figura 4.17. Supondo-se que a corrente de carga seja praticamente sem ripple, a corrente que circula pelo capacitor corresponde à componente alternada da corrente do indutor, conforme mostrado na figura 4.18. O ripple de tensão no capacitor determina-se pela integral da área hachurada na figura 4.19.

$$\Delta V_C = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I_C dt \quad (4.8)$$

Que resulta em:

$$\Delta V_C = \frac{1}{C_o} \left( \frac{\Delta I_L t_{ON}}{8} + \frac{\Delta I_L t_{OFF}}{8} \right) = \frac{\Delta I_L T}{8C_o} \quad (4.9)$$

Substituindo-se o valor de  $\Delta I_L$  da expressão de  $L_1$ , chegamos à expressão que representa o valor da capacitância  $C$ , que é dada em função do ripple desejado para a tensão de saída.

$$C = \frac{V_o(V_{IN} - V_o)}{8\Delta V_o V_{IN} f^2 L_1} \quad (4.10)$$

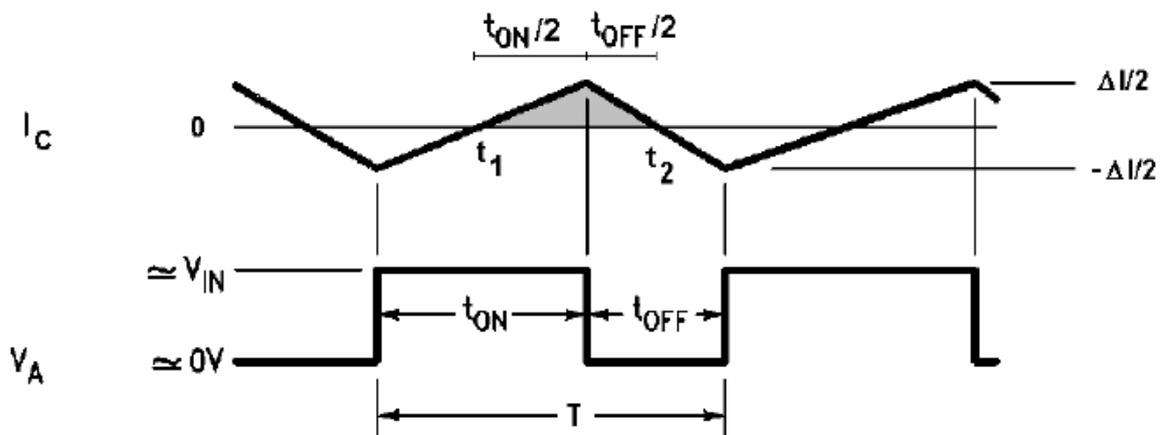


Figura 4.19 Corrente no capacitor C

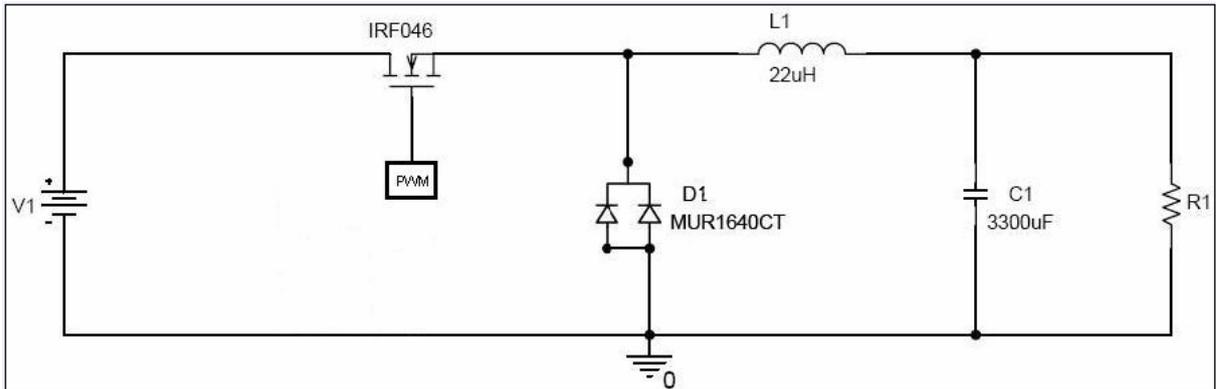


Figura 4.20 Conversor Buck implementado

No conversor implementado, foram utilizados Mosfets IRFZ46, que atuam como chave controlada por modulação por largura de pulsos, a partir de sinais provenientes do microcontrolador.

#### 4.11 Montagem do Circuito do Módulo Controlador

O protótipo do módulo controlador foi implementado obedecendo a disposição mostrada na figura 4.21, onde podemos identificar os itens numerados a seguir:

1 - 2 sensores de corrente, um para o módulo fotovoltaico e outro para o módulo eólico.

2 - 4 sensores de tensão, um para o módulo fotovoltaico, um para o módulo eólico, um para o módulo baterias e outro para a carga principal.

3 - 2 módulos básicos contendo os microcontroladores PIC18F452.

4 - Circuito regulador de tensões para todos os circuitos envolvidos.

5 - Circuito driver para os elementos de potência, cujo diagrama encontra-se no anexo 4.3.

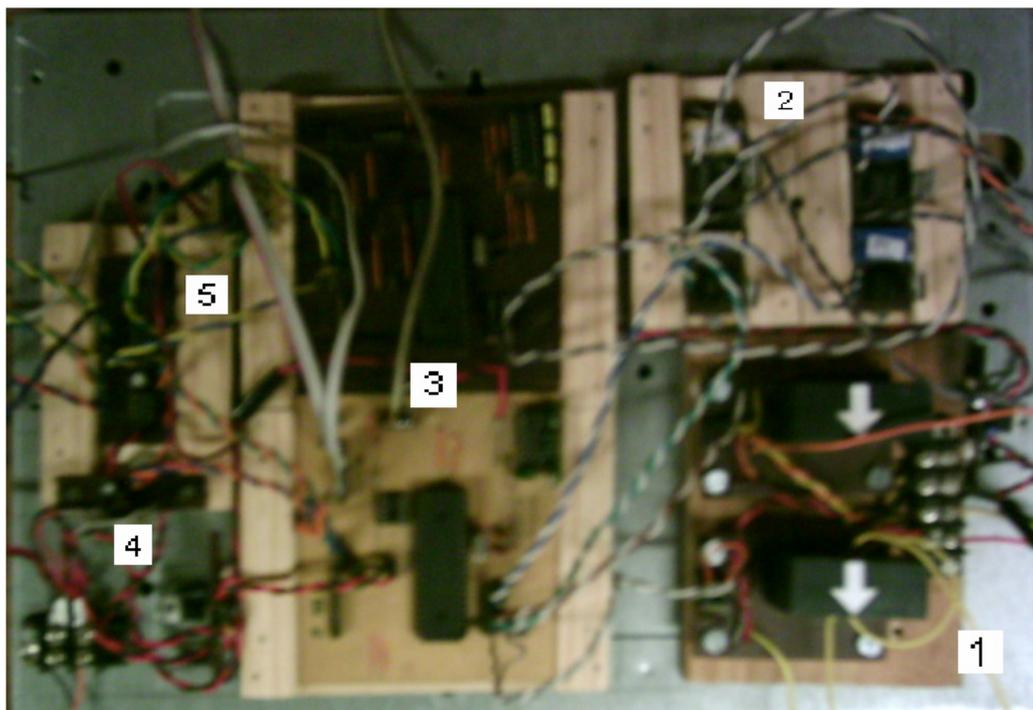


Figura 4.21: Placa principal do módulo controlador

Por se tratar de um modelo experimental, nesse protótipo a fiação ainda não havia sido agrupada e arranjada nas respectivas canaletas.

Os circuitos de potência estão em placa separada, fixada num dissipador de calor, como podemos ver na figura 4.23.

Foram utilizados nessa placa, 5 (cinco) MOSFETS de potência, de referência IRFZ46, cuja curva de operação segura está representada na figura 4.22, que nos mostra na área de operação, uma capacidade de dissipação de 200W em 12 V.

Para o referido semicondutor, problemas de superaquecimento podem tirá-lo dessa área de operação, por isso é indicado o uso de um circuito “Snubber” adequado.

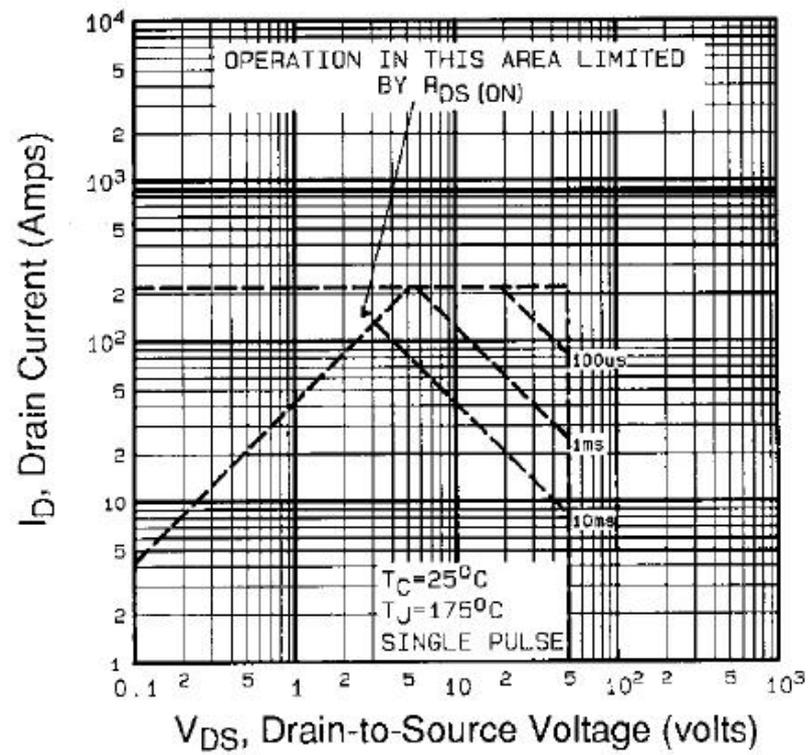


Figura 4.22: Área de operação segura do MOSFET



Figura 4.23: Placa de potência do módulo controlador

Na parte frontal do módulo mostrado na figura 4.24, temos dois displays, dois conectores DB9, para comunicação serial e os respectivos conectores para as duas fontes de energia, baterias, carga secundária e carga principal. Também temos os leds sinalizadores. Isso é mostrado na figura 4.20 e descrito à seguir:

Parte superior:

- Led indicador de Fonte 1 operando dentro dos limites.
  - Led indicador de Fonte 2 operando dentro dos limites.
  - Led indicador de Microcontrolador rodando o programa.
- Display 1: Mostra os valores instantâneos de tensão, corrente, potência e razão da modulação na chave de potência ocorridos nas duas fontes.
- Conector DB9: Serve para fazer a ligação entre o microcontrolador e um computador externo, enviando os dados mostrados pelo display, possibilitando a análise dos dados instantâneos produzidos em cada fonte de geração de energia.

Parte inferior:

- Led indicador de baterias carregadas.
  - Led indicador de baterias descarregadas.
  - Led indicador de Microcontrolador rodando o programa.
- Display 2: Mostra os valores instantâneos de tensão na carga principal, tensão no banco de baterias.
- Conector DB9: Serve para fazer a ligação entre o microcontrolador e um computador externo, enviando os dados mostrados pelo display, possibilitando a análise dos dados instantâneos de tensão na carga e banco de baterias.

Temos ainda os conectores para ligação das fontes, baterias, carga auxiliar e carga principal, respectivamente.