

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMA MICROCONTROLADO USADO NO CONTROLE E MONITORAÇÃO
DE BANCO DE BATERIAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NELSO GAUZE BONACORSO

FLORIANÓPOLIS, SETEMBRO DE 1991

SISTEMA MICROCONTROLADO USADO NO CONTROLE E MONITORAÇÃO
DE BANCO DE BATERIAS

NELSO GAUZE BONACORSO

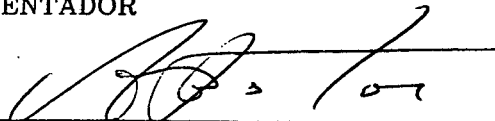
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA ELÉTRICA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM
SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO.



Prof. Hari Bruno Mohr, Dr.
ORIENTADOR



Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.
CO-ORIENTADOR




Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr. D'Etat
COORDENADOR DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Hari Bruno Mohr, Dr.



Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.



Prof. Enio Valmor Kassik, Dr. Ing.



Prof. Plinio Benedicto de Lauro Castrucci, Dr.

Ao meu Pai, Gabriel.

A minha Mãe, Anna.

A minha Esposa, Jucelaine.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Hari Bruno Mohr, pela orientação e apoio sem o qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

Ao Professor Ivo Barbi, pela dedicação e ajuda prestada ao longo deste trabalho.

Ao Professor José Renes Pinheiro, pela amizade, orientação e pelo grande incentivo transmitido durante a realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Catarina e a CAPES pelo apoio técnico e financeiro.

SUMÁRIO

SIMBOLOGIA	ix
FÓRMULAS QUÍMICAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUÇÃO	xv

CAPÍTULO I - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A CÉLULA ELETROQUÍMICA DE Pb/PbO₂ COM O ELETRÓLITO DE H₂SO₄

1.1 - Introdução	01
1.2 - Princípio Básico de Funcionamento	02
1.3 - Capacidade	04
1.4 - Vida Útil	06
1.5 - Tensão	07
1.5.1 - Tensão de Corte	08
1.5.2 - Tensão de Flutuação	08
1.5.3 - Tensão Final de Recarga	09
1.6 - Resistência Interna	10
1.7 - Densidade	12
1.8 - Método de Carga	12
1.9 - Conclusão	14

CAPÍTULO II - CONVERSOR ESTÁTICO USADO NO PROCESSO DE CARGA
DO BANCO DE BATERIAS

2.1 - Introdução	15
2.2 - Expressão para o Cálculo do Indutor de Filtragem	16
2.3 - Projeto do Carregador	20
2.3.1 - Tensão Secundária do transformador	20
2.3.2 - Potência do transformador	21
2.3.3 - Dimensionamento dos Diodos e Tiristores	22
2.3.4 - Determinação do Indutor de Filtragem	23
2.3.5 - Proteção	24
2.4 - Simulação do Carregador Projetado	25
2.5 - Simulação do Carregador Usado	27
2.6 - Conclusão	30

CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO DO SISTEMA E DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

3.1 - Introdução	31
3.2 - Circuito de Sincronismo	32
3.3 - Circuito de Amplificação e Isolação	34
3.4 - Circuito do Sensor de Temperatura	35
3.5 - Circuito do Sensor de Corrente e Proteção	37
3.6 - Circuito dos Sensores de tensão	37
3.7 - Programa Principal	39
3.8 - Rotinas de Interrupção	40
3.9 - Rotina de Leitura e Proteção	41
3.10 - Rotina Erro/Compensador	43

3.11 - Rotina de Teclado e Transmissão ao Vídeo	45
3.12 - Conclusão	47
CAPÍTULO IV - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	
4.1 - Introdução	49
4.2 - Carga das Baterias	49
4.3 - Descarga das Baterias	52
4.4 - Resposta Transitória do Sistema	55
4.4.1 - Resposta Transitória da Corrente	56
4.4.2 - Resposta Transitória da Tensão	56
4.5 - Resposta à Falta de Rede	59
4.6 - Conclusão	60
CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APÊNDICE - O MICROCONTROLADOR 80535	66

SIMBOLOGIA

C	- Capacidade de uma célula eletroquímica
D	- Densidade do Eletrólito
E	- Potencial de uma bateria
E_c	- Potencial de uma célula eletroquímica
E_c^0	- Potencial normal de uma célula eletroquímica
E_p	- Potencial da placa positiva
E_p^0	- Potencial normal da placa positiva
E_n	- Potencial da placa negativa
E_n^0	- Potencial normal da placa negativa
f	- Frequência
FP	- Fator de potência
i	- Corrente de saída do retificador híbrido
I_{bc}	- Corrente de base crítica
I_d	- Corrente média aplicada no banco de baterias
I_f	- Corrente de flutuação
I_m	- Corrente média
I_r	- Corrente de recarga
I_{rms}	- Corrente eficaz
I_p	- Corrente no primário do transformador
K	- Ganho do Compensador
K_n	- Constante da equação de Nernst
L_m	- Indutância mínima

n_b	- Número de baterias ligadas em série
n_e	- Número de células por baterias
P	- Potência ativa
Q	- Coeficiente de atividade de uma reação química
R_b	- Resistência interna da bateria
R_i	- Resistência interna do banco de baterias
R_L	- Resistência do indutor de filtragem
S	- Potência aparente
T	- Temperatura
t_a	- Tempo de atraso
t_{dh}	- Taxa de distorção harmônica
u	- Tensão de saída no retificador híbrido
V_1 à V_6	- Sinais analógicos de tensão
V_{b1} à V_{b4}	- Tensões das baterias por elemento
V_{bm}	- Tensão máxima por elemento
V_c	- Tensão de corte
V_d	- Tensão média aplicada no banco de baterias
V_{dm}	- Tensão média máxima aplicada no banco de baterias
V_{rms}	- Tensão eficaz
V_f	- Tensão de flutuação
V_m	- Tensão de pico
V_p	- Tensão primária do transformador
V_{pr}	- Tensão de pico reversa
V_r	- Tensão de final de recarga
V_s	- Tensão secundária do transformador
V_{tt}	- Tensão do banco de baterias por elemento

α	- Ângulo de disparo dos tiristores do carregador
α_c	- Ângulo crítico de disparo dos tiristores
α_m	- Ângulo mínimo de disparo dos tiristores
α_n	- Ângulo de disparo dos tiristores atual
α_{n-1}	- Ângulo de disparo dos tiristores anterior
ΔI	- Variação da corrente de saída do retificador híbrido
ϵ	- Erro de corrente ou Tensão
w	- Frequência angular

FÓRMULAS QUÍMICAS

H^+	- Íon hidrogênio
H_2O	- Água
H_2SO_4	- Ácido Sulfúrico
O_2	- Oxigênio
Pb^{++}	- Íon chumbo
PbO_2	- Dióxido de chumbo
$PbSO_4$	- Sulfato de chumbo
SO_4^{--}	- Íon Sulfato

RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento de um carregador de baterias microcontrolado em malha fechada usado para controlar a carga, monitorar a descarga das baterias e ainda detectar falhas na estrutura.

Neste trabalho dá-se ênfase ao algoritmo de controle, onde é aplicado um método de carga que utiliza as informações de tensão, corrente e temperatura.

O emprego desta técnica de controle tem por objetivo projetar um carregador de baterias de alto desempenho, capaz de prolongar até o limite possível a vida útil das baterias, nas aplicações em sistemas de alimentação ininterrupta de energia de alta confiabilidade.

Um protótipo foi construído e testado em laboratório. Neste trabalho, ainda são apresentados os circuitos que compõem o sistema, as rotinas do programa desenvolvido e os resultados experimentais.

ABSTRACT

This work is about the development of a closed loop microcontrolled based system for battery charging, monitoring charge and discharge, and even more, detecting structure failures.

The control algorithm is emphasized, being applied a charging method which uses voltage, current and temperature information.

The objective of using this control technique is the design of a high performance battery charger, allowing the longest battery life possible, in reliable UPS applications.

A prototype has been built and laboratory tested. Experimental results, developed program routines and the system circuits are included.

INTRODUÇÃO

A Eletrônica de Potência vem sendo revolucionada nesta última década em virtude do avanço da tecnologia da microeletrônica. Atualmente, sistemas controlados à microprocessadores e à microcontroladores são frequentemente usados no controle de conversores estáticos. Estes sistemas de controle digital apresentam duas grandes vantagens em relação ao controle analógico: a primeira, possibilita uma redução dos circuitos de comando das chaves eletrônicas, de controle do processo e ainda de proteção da estrutura, diminuindo o tamanho e aumentando a confiabilidade do sistema; a segunda, permite a implementação de leis de controle complexa, sem nenhuma modificação do hardware [1].

Desde a II Guerra Mundial, a tecnologia de baterias e dispositivos eletroquímicos vem sofrendo inúmeras modificações resultando em melhoramentos em suas características de operação e funcionamento. Nestas duas últimas décadas, não somente a quantidade como também os tipos de aplicação cresceram substancialmente, resultando um aumento considerável no mercado e na comercialização de baterias [2,17].

O crescente interesse em baterias e na tecnologia eletroquímica, é devido à necessidade criada pelos avanços no desenvolvimento de equipamentos eletrônicos portáteis, sistemas estacionários de armazenamento de energia, veículos elétricos, equipamentos espaciais e principalmente nos sistemas de alimentação ininterrupta (UPS).

Nas aplicações em que a vida útil do banco de baterias e a perfeita condição de sua utilização são de grande relevância para o sistema, exige-se cuidados especiais com medições e ajustes do carregador constantemente. Esta tarefa pode ser entregue a um microcontrolador que facilmente pode realizar o trabalho de efetuar medidas, detectar falhas, controlar a carga e monitorar a descarga, assegurando um bom funcionamento do sistema e proporcionando uma longa vida útil às baterias.

No Capítulo I, é apresentado uma revisão geral da célula eletroquímica de Pb/PbO_2 com eletrólito de H_2SO_4 , ressaltando seu princípio de funcionamento, suas características e a influência da temperatura em seus parâmetros. Neste capítulo também é apresentado o método de carga ideal para se obter um aumento da vida útil das baterias.

No Capítulo II, são apresentados a estrutura retificadora usada e as equações utilizadas para o cálculo do indutor de filtragem, do transformador, diodos e tiristores. Também neste capítulo, são apresentados os resultados da simulação do carregador projetado e do utilizado para carregar o banco de baterias.

No Capítulo III, é realizada uma descrição das diversas funções de todos os circuitos construídos e que fazem parte do sistema. O programa desenvolvido em linguagem assembly para controlar e monitorar todo o sistema é apresentado em forma de subrotinas para melhor compreensão do funcionamento desta estrutura.

O Capítulo IV apresenta os resultados experimentais obtidos em laboratório através dos ensaios de carga e descarga do banco de baterias e aquisições de respostas transitórias e de regime permanente do sistema.

CAPÍTULO I

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A CÉLULA ELETROQUÍMICA DE Pb/PbO₂ COM O ELETRÓLITO DE H₂SO₄

1.1 - Introdução

As baterias de chumbo-ácido continuam sendo objeto de estudos em projetos de desenvolvimento e aperfeiçoamento, uma vez que, dentre os tipos de baterias que foram e estão sendo projetados, a bateria chumbo-ácido continua sendo, economicamente a mais viável.

Nas baterias de chumbo-ácido as massas ativas se comportam como eletrodo de segunda espécie, possuindo uma série de vantagens cujas mais significantes são:

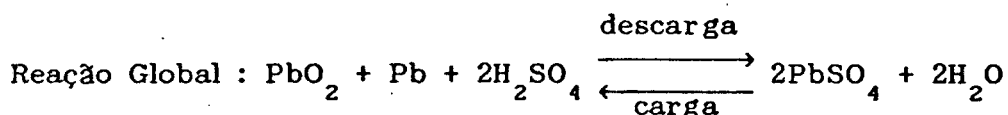
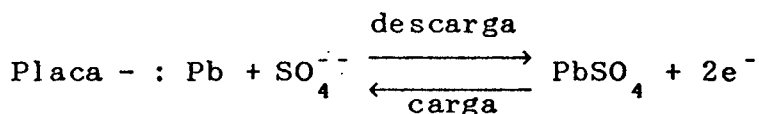
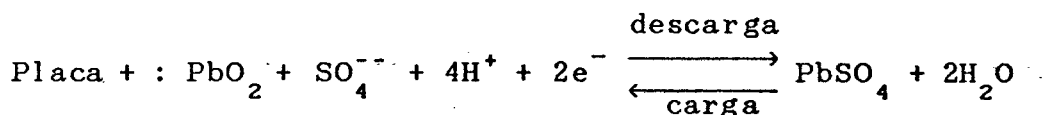
- Estabilidade e constância das formas dos eletrodos;
- Conservação da simetria entre as placas positivas e negativas;
- O processo de descarga em ambas as placas, levam à formação do mesmo produto: PbSO₄.

Por outro lado, os eletrodos possuem uma estrutura porosa

complicada, onde uma série de parâmetros de natureza física esta envolvida no processo de funcionamento das placas: porosidade, área efetiva, distribuição dos poros, viscosidade do eletrólito, solubilidade do $PbSO_4$, constantes de velocidade dos processos eletródicos, coeficiente de transferência, resistividade das massas ativas e das grades e perdas devido a resistência ohmica nas interfaces sólido-sólido e sólido-líquido [2].

1.2 - Princípio Básico de Funcionamento

A bateria é constituída por placas negativas de esponja de chumbo fixadas em grades constituídas por uma liga de chumbo-antimônio e placas positivas de dióxido de chumbo fixadas no mesmo tipo de grade. Como eletrólito, utiliza-se solução de H_2SO_4 cuja concentração depende do tipo de aplicação da bateria. Esta solução de H_2SO_4 está dissociada em ions H^+ e ions SO_4^{--} . Embora a cinética eletródica dos processos que ocorrem nas duas placas envolvam uma série de etapas dentro dos poros dos eletrodos, as duas semi-reações globais em cada placa podem ser generalizadas por:



Na descarga os dois materiais ativos (Pb e PbO_2) são convertidos em PbSO_4 , o H_2SO_4 é consumido e há produção de água. Os dois elétrons, produto da reação de descarga da placa negativa vão circular pelo circuito elétrico ligado na bateria até a placa positiva. Na placa positiva, estes dois elétrons serão reagentes na reação de descarga.

Na carga, a corrente circula na bateria em sentido inverso, as reações químicas em ambas as placas também se invertem, resultando que o PbSO_4 da placa positiva se converterá em PbO_2 , enquanto que o PbSO_4 da placa negativa se reduzirá a Pb . Ao mesmo tempo é consumido água e produzido ácido. Neste caso, elétrons são fornecidos a placa negativa por uma fonte de corrente externa ligada na bateria, sendo esses elétrons reagentes na reação de carga da placa negativa. Já na reação de carga da placa positiva, ocorre a eletrólise da água, fornecendo como um dos produtos desta reação dois elétrons que voltam a fonte de corrente.

A reação global de uma bateria surge da comparação das duas reações químicas das placas positiva e negativa. Verifica-se que na reação de descarga global há formação de duas moléculas de PbSO_4 e duas de água. Já na reação global de carga há formação de Pb , PbO_2 e duas moléculas de H_2SO_4 .

Na descarga, forma-se PbSO_4 sólido o qual tende a se depositar sobre as partículas da massa ativa e ocluir os poros dos eletrodos. Como consequência, tende a ocorrer um certo retardamento na estabilidade da distribuição da corrente no interior dos poros, e devido ao efeito isolante do PbSO_4 , ocorre uma espécie de passivação das massas ativas. A Figura 1.1 ilustra esquematicamente o modo de funcionamento da bateria chumbo-ácido. Devido a esses fenômenos, o aproveitamento prático das massas ativas está entre 20 a 50% o qual depende significativamente da corrente de descarga. Em descargas elevadas, o processo fica limitado podendo baixar o grau de

aproveitamento da massa ativa para 10% ou menos [2].

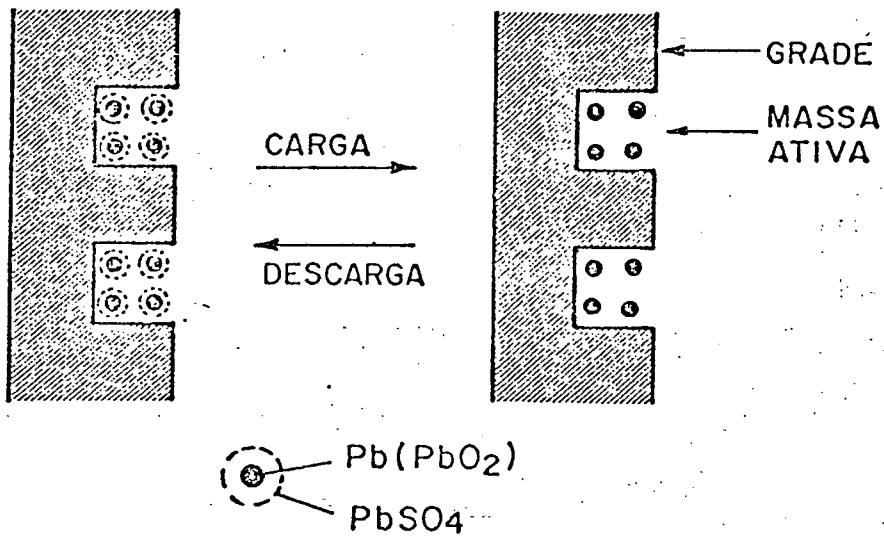


Fig. 1.1 - Princípio de Funcionamento da Bateria.

1.3 - Capacidade

A capacidade de uma bateria é, normalmente, definida em amperes-horas (Ah) para uma descarga com um regime determinado, isto é, com determinada corrente de descarga, até uma determinada tensão a uma determinada temperatura. A capacidade é função de um conjunto de parâmetros correlacionadas entre si. A capacidade depende:

- da quantidade de materiais ativos;
- dos parâmetros construtivos (área e espessura das placas);
- dos parâmetros operacionais (corrente de descarga, tensão de corte

e temperatura);

- do método de carga.

A capacidade das baterias chumbo-ácido é reduzida durante períodos de temperatura baixa. A Figura 1.2 mostra a variação da capacidade em função da temperatura do eletrólito [5,6].

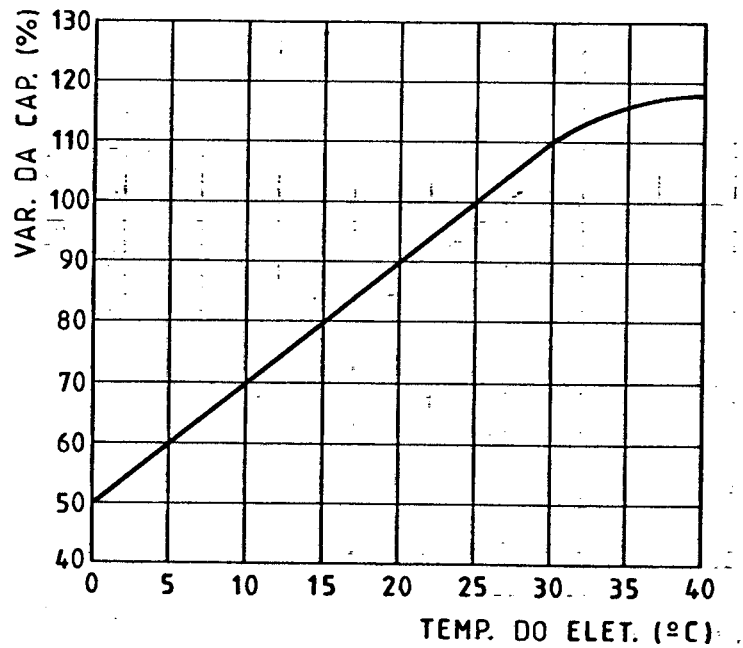
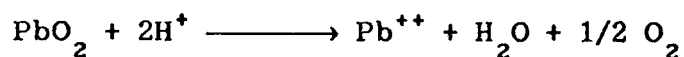


Fig. 1.2 - Variação da Capacidade em Função da Temperatura do Eletrólito.

Por outro lado, a perda de capacidade ocorre pelo processo de auto-descarga da placa positiva, conforme a reação química:



Nesta reação de auto-descarga, temos o ataque dos íons H^+ à molécula de PbO_2 com o deslocamento do íon Pb^{++} , formação de água e liberação de oxigênio. E ainda, em temperaturas elevadas, a velocidade da reação química de auto-descarga tende a aumentar.

1.4 - Vida Útil

A vida de uma bateria pode ser expressa em tempo de serviço, quando opera em paralelo, ou em quantidade de ciclos, quando opera ciclicamente. Entende-se por operação em paralelo quando a bateria for mantida o maior tempo de sua vida em flutuação, sofrendo esporadicamente descargas de baixa profundidade. Compreende-se por operação cíclica quando a bateria for mantida a maior parte de sua vida em carga e descarga.

A vida, quer em paralelo ou cíclica, depende:

- da temperatura;
- do método de carga;
- da profundidade das descargas;
- da manutenção.

A Figura 1.3 ilustra a redução da vida útil (expressa em percentual) em função da temperatura do eletrólito e a Figura 1.4 mostra a vida útil (expressa em quantidade de ciclos) em relação a profundidade das descargas na temperatura de 25 °C [5,6]. Nota-se através destes gráficos que a vida útil de

uma bateria é fortemente afetada pelas temperaturas elevadas e descargas profundas.

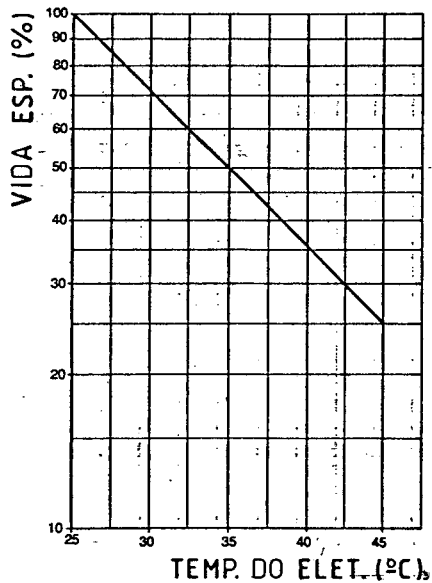


Fig. 1.3 - Vida Útil em Função da Temperatura do Eletrólito.

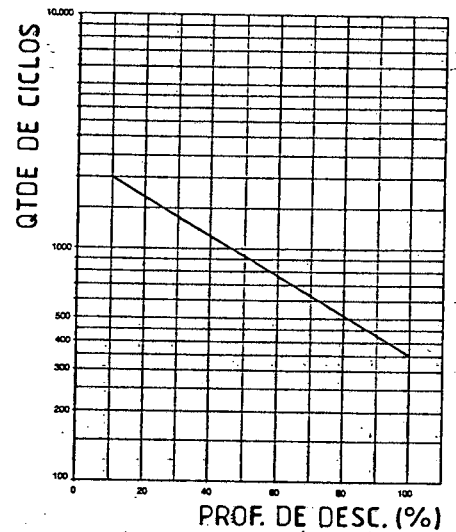


Fig. 1.4 - Vida Útil em Função da Profundidade das Descargas.

1.5 - Tensão

A equação de Nernst (1.1) expressa a variação do potencial de uma célula eletroquímica, onde K_n é uma constante e o coeficiente de atividade "Q" depende da concentração dos reagentes e produtos.

$$E_c = E_c^\circ - K_n \cdot T \cdot \ln Q \quad (1.1)$$

Para uma célula ácida, temos que:

$$E_c = E_p - E_n \quad (1.2)$$

Nas condições normais de temperatura e pressão (25 °C /1 atm), temos: $E_p^\circ = 1,685$ v e $E_n^\circ = - 0,356$ v. Substituindo esses valores na equação (1.2) tem-se o potencial normal de uma célula ácida $E_c^\circ = 2,041$ V. A tensão varia, durante a carga e durante a descarga, em função da corrente fornecida ou retirada, do tempo decorrido de carga ou descarga, da temperatura e das características construtivas [3,4,5,6].

1.5.1 - Tensão de Corte

A tensão de final de descarga ou de corte é a tensão na qual a bateria é considerado tecnicamente descarregada, e abaixo do qual, em condições normais, torna-se difícil a limpeza do sulfato das placas durante a carga seguinte.

Descargas profundas comprometem a capacidade e a vida útil da bateria, devido ao depósito de uma parcela de $PbSO_4$ no fundo das células eletroquímicas.

1.5.2 - Tensão de Flutuação

Tensão de flutuação é a tensão na qual a bateria é mantida carregada. Uma tensão de flutuação excessivamente alta faz com que uma

corrente de maior intensidade atravesse os elementos, ocasionando desgaste excessivo das placas carregadas, diminuindo com isso a vida útil da bateria e causando maior perda de água, que em níveis normais de tensão de flutuação. Por outro lado, uma tensão de flutuação muito baixa reduz a capacidade de descarga da bateria por não compensar a reação de auto-descarga da placa positiva.

O coeficiente de variação da tensão de flutuação com a temperatura é de aproximadamente $-5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ para cada elemento. A tensão de flutuação indicada para a temperatura de 25°C é de $2,20 \text{ V}$ por elemento [5,8].

1.5.3 - Tensão Final de Recarga

Tensão final de recarga é a tensão na qual a bateria é transferida do estado de recarga para o estado de flutuação. O valor da tensão final de recarga depende da corrente de carga e da temperatura. O coeficiente de variação da tensão final de recarga com a temperatura é de aproximadamente $-5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ para cada elemento. A Figura 1.5 mostra a variação da tensão por elemento em função do percentual da capacidade retornada para varios valores de corrente de carga na temperatura de 25°C .

Observa-se que para razões de carga maiores que $C/5$ a tensão final de recarga será maior, provocando uma grande aceleração na reação de eletrólise da água com a liberação de excessiva quantidade dos gases hidrogênio e oxigênio. A consequência imediata desta reação é a perda de água e de matéria ativa. Também nota-se que o percentual de capacidade retornado neste caso é menor que 80% [5,8].

Verifica-se que para razões de carga menores que $C/100$, o percentual de capacidade retornada será maior que 100%, a tensão final de recarga será menor e o tempo de carga das baterias irá aumentar.

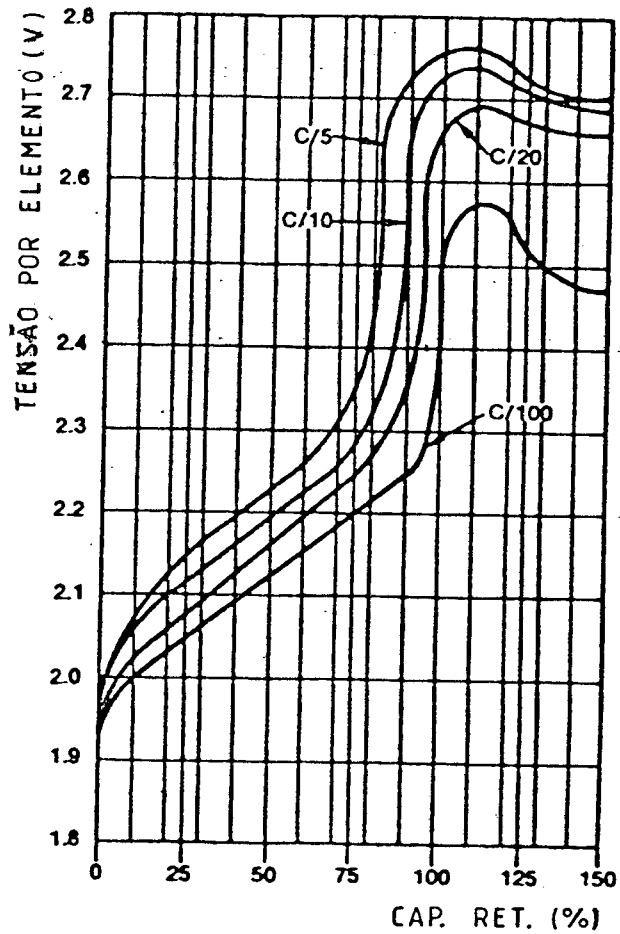


Fig. 1.5 - Tensão por Elemento em Função do Percentual da Capacidade Retornada para Varias Taxas de Recarga na Temperatura de 25 °C.

1.6 - Resistência Interna

A resistência interna de um elemento ou da bateria é uma grandeza complexa e difícil de ser definida, varia com o tipo de placa, com o tipo de construção, estado de carga, temperatura, etc. A tensão nos terminais da bateria durante a carga é $E + I.R_b$ e durante a descarga é $E - I.R_b$ [4,5]. A Figura 1.6 ilustra a variação da resistência interna em função do estado da carga na temperatura de 25 °C de uma célula de 50 Ah. Nota-se um incremento significativo no valor da resistência interna de uma bateria no fim de sua carga.

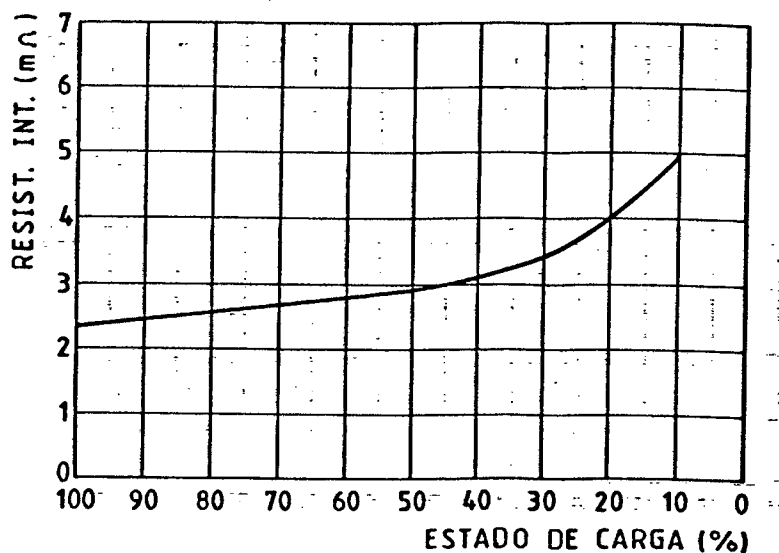


Fig. 1.6 - Resistência Interna em Função do Estado de Carga.

1.7 - Densidade

A densidade de todos os elementos de uma bateria diminui com a descarga e aumenta com a carga. Devido ao desprendimento de gases com o decorrer do tempo o nível do eletrólito vai lentamente baixando e como consequência sua densidade vai aumentando. Adicionando-se água destilada a densidade volta ao seu valor original.

A Equação 1.3 indica a correção da densidade em função da temperatura do eletrólito. Observa-se nesta expressão uma diminuição na densidade do eletrólito em temperaturas acima de 25 °C.

$$D_T = D_{25} - 0.0007.(T - 25) \quad (1.3)$$

1.8 - Método de Carga

Capacidade e vida útil são parâmetros importantes das baterias afetados fortemente pelos métodos de carga. A estratégia de controle usada para carregar e manter a carga tem um efeito significativo no desempenho das células de um banco de baterias. Otimizar esta estratégia, visando aumentar a vida útil e sem prejudicar a capacidade não é uma tarefa fácil.

A grande maioria dos carregadores não utilizam a variável temperatura no método de carga para corrigir os níveis de tensão final de carga e de flutuação. Se o sistema for ajustado para trabalhar à temperatura de 25 °C, neste ponto teremos um ótimo funcionamento, por outro lado, em temperaturas baixas a carga não se completa, e o mais drástico é a sobrecarga das baterias em temperaturas acima deste valor.

Entre os métodos mais usados na carga de banco de baterias, o método de dois estados e que utiliza as informações de tensão, corrente e temperatura é o que proporciona uma vida útil maior às baterias [8].

No estado de recarga (primeiro estado) é aplicado uma corrente constante (I_r) visando retornar de 90% a 95% da capacidade das baterias. Esta corrente é mantida até que o nível de tensão atinja um dado valor (V_r) fixado pela temperatura, neste instante o banco de baterias passa do estado de recarga para a flutuação.

No estado de flutuação (segundo estado) é aplicado uma tensão constante de certa intensidade (V_f) fixado pela temperatura, com o objetivo de completar e manter a carga das baterias. Neste estado a corrente vai decrescendo lentamente até um certo valor (I_f) onde ocorre o equilíbrio entre a quantidade de carga fornecida e o processo de auto-descarga da placa positiva. A Figura 1.7 ilustra este método.

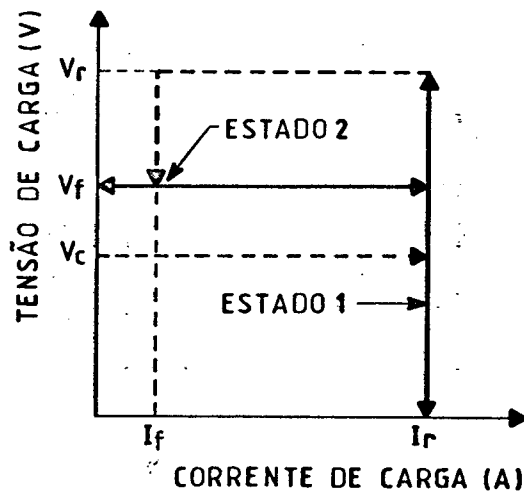


Fig. 1.7 - Diagrama do Método de dois Estados.

1.9 - Conclusão

Para controlar e monitorar um banco de baterias é necessário ter um grande conhecimento na área de eletroquímica e de controle de processo.

O uso do microcontrolador no processo do controle de carga e monitoração de um banco de baterias facilita a implementação do método de carga e comando das chaves do carregador.

Observa-se que a temperatura e o método de carga empregado no processo de carga afetam fortemente a capacidade e a vida útil das baterias chumbo-ácidas.

CAPÍTULO II

CONVERSOR ESTÁTICO USADO NO PROCESSO DE CARGA DO BANCO DE BATERIAS

2.1 - Introdução

Existem diversos tipos de conversores estáticos que a literatura apresenta com possibilidade de serem usados na operação de carga de um banco de baterias. O retificador monofásico híbrido é o mais indicado por ser uma estrutura simples, econômica, robusta, e de fácil adaptação do controle digital.

Essa estrutura é composta por dois tiristores e dois diodos, como mostra a Figura 2.1. No retificador híbrido, a tensão na carga nunca é negativa, pois os diodos da ponte funcionam como diodos de comutação no circuito, toda a vez que a tensão de alimentação passar por zero. O tiristor que esta conduzindo continua nessa condição até que o outro tiristor seja disparado, se a carga for indutiva.

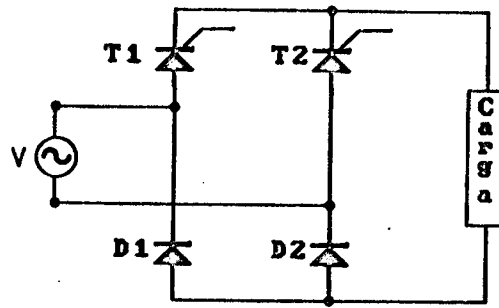


Fig. 2.1 - Retificador Monofásico Híbrido.

2.2 - Expressão para o Cálculo do Indutor de Filtragem

Na Figura 2.2, é apresentado o conjunto retificador, indutor de filtragem e banco de baterias. A função do indutor de filtragem neste sistema é o de garantir, com o mínimo de indutância, uma condução contínua da corrente no estado de recarga das baterias. A forma de onda da corrente em condução contínua, apresenta um valor eficaz menor que em condução descontínua. Esse aspecto favorece no que diz respeito à vida útil das baterias.

A Figura 2.3, mostra as formas de onda da tensão de saída do retificador e a corrente no indutor de filtragem, em condução contínua.

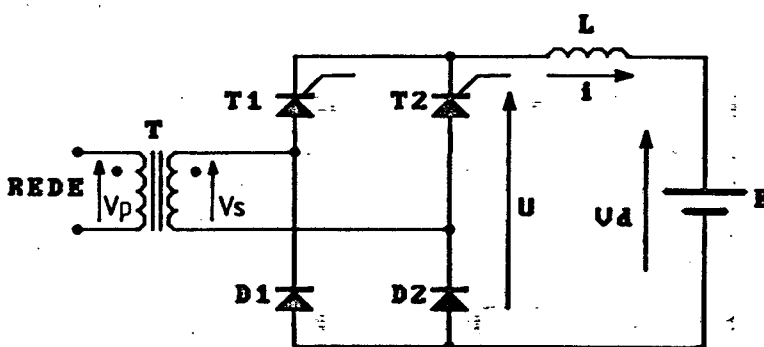


Fig. 2.2 - Circuito Retificador.

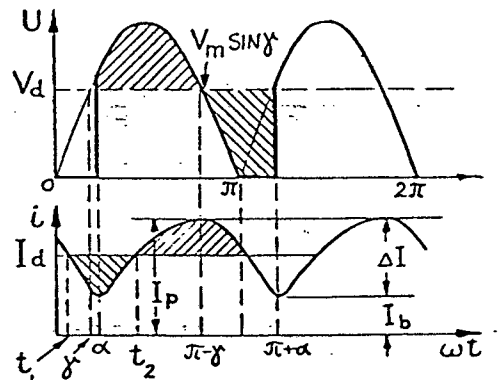


Fig. 2.3 - Condução Contínua.

Observando a Figura 2.3, temos:

$$u = 0 \quad \text{para} \quad 0 < \omega t < \alpha \quad (2.1)$$

$$u = V_m \sin \omega t \quad \text{para} \quad \alpha < \omega t < \pi \quad (2.2)$$

A tensão média é expressa pela relação:

$$V_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u \, d(\omega t) \quad (2.3)$$

Resolvendo a integral da expressão (2.3), obtemos:

$$V_d = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) \quad (2.4)$$

O ângulo γ é o ângulo no qual o valor instantâneo alternado é igual a tensão média V_d , então temos:

$$V_d = V_m \sin \gamma \quad (2.5)$$

Substituindo a expressão (2.4) em (2.5), teremos:

$$\sin \gamma = \frac{(1 + \cos \alpha)}{\pi} \quad (2.6)$$

Resolvendo a expressão 2.6 para $\gamma = \alpha$, obtemos:

$$\gamma = \alpha_m = 35,3 \text{ graus}$$

A partir do circuito da Figura 2.2, temos:

$$u = v_l + V_d \quad (2.7)$$

Isolando a corrente do circuito, obtemos:

$$i = \frac{1}{w.L} \int (u - V_d) d(wt) \quad (2.8)$$

A partir da equação (2.8) e da Figura 2.3 o valor de pico a pico da componente alternada da corrente retificada pode ser expressa por:

$$\Delta I = I_p - I_b = \frac{1}{w.L} \int_{\alpha}^{\pi-\gamma} (V_m \sin wt - V_d) d(wt) \quad (2.9)$$

O valor instantâneo da corrente é dado por:

$$i - I_b = \frac{1}{w.L} \int_{\alpha}^{wt} (u - V_d) d(wt) \quad (2.10)$$

Para: $0 < wt < \alpha$, temos:

$$i - I_b = \frac{V_d}{w.L} (\alpha - wt) \quad (2.11)$$

Para: $\alpha < wt < \pi$, temos:

$$i - I_b = \frac{V_m}{w.L} (\cos \alpha - \cos wt) + \frac{V_d}{w.L} (\alpha - wt) \quad (2.12)$$

O valor médio da corrente é dado por:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i \, d(\omega t) \quad (2.13)$$

Substituindo as equações (2.11) e (2.12) em (2.13), obtemos:

$$I_d = I_b + \frac{V_m}{w \cdot L} \left(\frac{\alpha}{\pi} + \frac{\cos \alpha}{2} + \frac{\sin \alpha}{\pi} - \frac{1}{2} \right) \quad (2.14)$$

O ângulo crítico de disparo (α_c) é obtido resolvendo a equação $dI_b/d\alpha = 0$:

$$\frac{1}{\pi} - \frac{\sin \alpha_c}{2} + \frac{\cos \alpha_c}{\pi} = 0 \quad (2.15)$$

Resolvendo numericamente a equação (2.15), obtemos:

$$\alpha_c = 64,96 \text{ graus}$$

Substituindo o valor de α_c na equação 2.14, temos:

$$I_{bc} = I_d - 0,3609 \frac{V_m}{w \cdot L} \quad (2.16)$$

Fazendo $I_{bc} = 0$, teremos a indutância mínima:

$$L_m = 0,3609 \frac{V_m}{w \cdot I_d} \quad (2.17)$$

2.3 - Projeto do Carregador

O projeto do carregador envolve varios itens a serem especificados, tais como:

- Tensão secundária do transformador;
- Potência do transformador;
- Dimensionamento dos diodos e tiristores;
- Determinação da indutância de filtragem;
- Proteção.

Os dados para o projeto do carregador, são:

- Número de baterias ligadas em série: $n_b = 4$;
- Número de elementos por bateria: $n_e = 6$;
- Capacidade do banco de baterias: $C = 55 \text{ Ah}$;
- Tensão máxima por elemento: $V_{bm} = 2,6 \text{ V/e}$
- Corrente média de recarga: $I_d = C/25 = 2,2 \text{ A}$

2.3.1 - Tensão Secundária do Transformador

A tensão máxima do barramento das baterias é expressa pela equação:

$$V_{dm} = n_b \cdot n_e \cdot V_{bm} \quad (2.18)$$

Substituindo os dados de projeto na expressão (2.18), obteremos:

$$V_{dm} = 62,4 \text{ V}$$

Substituindo a tensão máxima do barramento das baterias e o ângulo mínimo de disparo na equação (2.4), teremos:

$$V_m = 108,0 \text{ V} \Rightarrow V_{rms} = 76,3 \text{ V}$$

Considerando a queda de tensão nos diodos (1,0 V) e tiristores (2,0 V), temos:

$$V_s \cong 80 \text{ V}$$

Tendo a rede de alimentação uma tensão eficaz de $V_p = 220 \text{ V}$, obteremos assim a relação de transformação do transformador:

$$n = \frac{V_p}{V_s} = \frac{220}{80} \Rightarrow n = 2,75$$

2.3.2 - Potência do Transformador

O fator de potência da ponte híbrida monofásica é dado pela equação (2.19) [9]:

$$FP = \cos \phi = \cos (\alpha/2) \quad (2.19)$$

Substituindo o ângulo crítico de disparo na equação (2.19), obteremos:

$$\cos \phi = 0,84$$

A potência ativa entregue as baterias é dado pela expressão (2.20):

$$P = V_{dm} \cdot I_d \quad (2.20)$$

Substituindo os valores na equação (2.20), teremos:

$$P = 137,3 \text{ W}$$

A potencia aparente é dada pela expressão (2.21):

$$S = \frac{P}{\cos \phi} \quad (2.21)$$

Substituindo os valores na expressão (2.21), temos:

$$S = 163 \text{ VA}$$

2.3.3 - Dimensionamento dos Diodos e Tiristores

A corrente média nos semicondutores do carregador é aproximadamente metade da corrente de recarga das baterias, ou seja:

$$I_m \cong I_d/2 = 1,1 \text{ A}$$

A tensão de pico reverso nos semicondutores do carregador deve ser superior a tensão de pico do secundário do transformador, isto é:

$$V_{pr} > \sqrt{2} \cdot V_s \Rightarrow V_{pr} > 113,2 \text{ V}$$

A partir das informações de corrente média e tensão de pico reversa nos semicondutores, especificamos os componentes:

- Tiristores \Rightarrow TIC 106B da Texas: * $V_{pr} = 200 \text{ V}$

$$* I_m = 3,2 \text{ A}$$

$$* I_{rms} = 5,0 \text{ A}$$

- Diodos \Rightarrow SK3/04 da Semikron: * $V_{pr} = 400 \text{ V}$

$$* I_m = 2,5 \text{ A}$$

2.3.4 - Determinação do Indutor de Filtragem

Substituindo os valores da tensão secundária, da frequência da rede e da corrente média de recarga na expressão (2.17), obteremos:

$$L_m = 49,2 \text{ mH}$$

2.3.5 - Proteção

A proteção contra sobre-correntes é realizada através de um circuito eletrônico (capítulo 3) que realiza a inibição dos disparos dos tiristores quando circular uma sobre-corrente nas baterias. E ainda no carregador é usado um fusível de proteção colocado em série com o enrolamento primário do transformador.

A corrente primária do transformador é fornecida pela equação (2.22):

$$I_P = \frac{S}{V_P} \quad (2.22)$$

Substituindo os valores na expressão (2.22), teremos:

$$I_P = 0,74 \text{ A}$$

Apartir da informação de corrente do primário do transformador, especificamos o fusível:

- Fusível: 1,0 A - 250 V.

Em virtude de existir no laboratório um retificador monofásico híbrido com características de funcionamento semelhantes ao carregador projetado, optou-se então, usar o carregador já existente do que executar o projeto.

2.4 - Simulação do Carregador Projetado

A simulação [20] foi realizada para a etapa mais crítica do sistema, ou seja, o estado de recarga das baterias. Os valores dos parâmetros do circuito são:

$$- u = \sqrt{2} \cdot 80 \cdot \sin wt$$

$$- L = 49,2 \text{ mH}$$

$$- R_L = 1 \Omega$$

$$- E = 57,6 \text{ V}$$

$$- R_i = 0,12 \Omega$$

$$- f = 60 \text{ Hz}$$

$$- \alpha = 42 \text{ graus}$$

A Figura (2.23), apresenta as formas de onda mais importante do carregador projetado:

- (a) Tensão do secundário do transformador;
- (b) Corrente do secundário do transformador;
- (c) Corrente do tiristor T1;
- (d) Corrente do diodo D1;
- (e) Corrente de recarga das baterias;
- (f) Tensão total do banco de baterias.

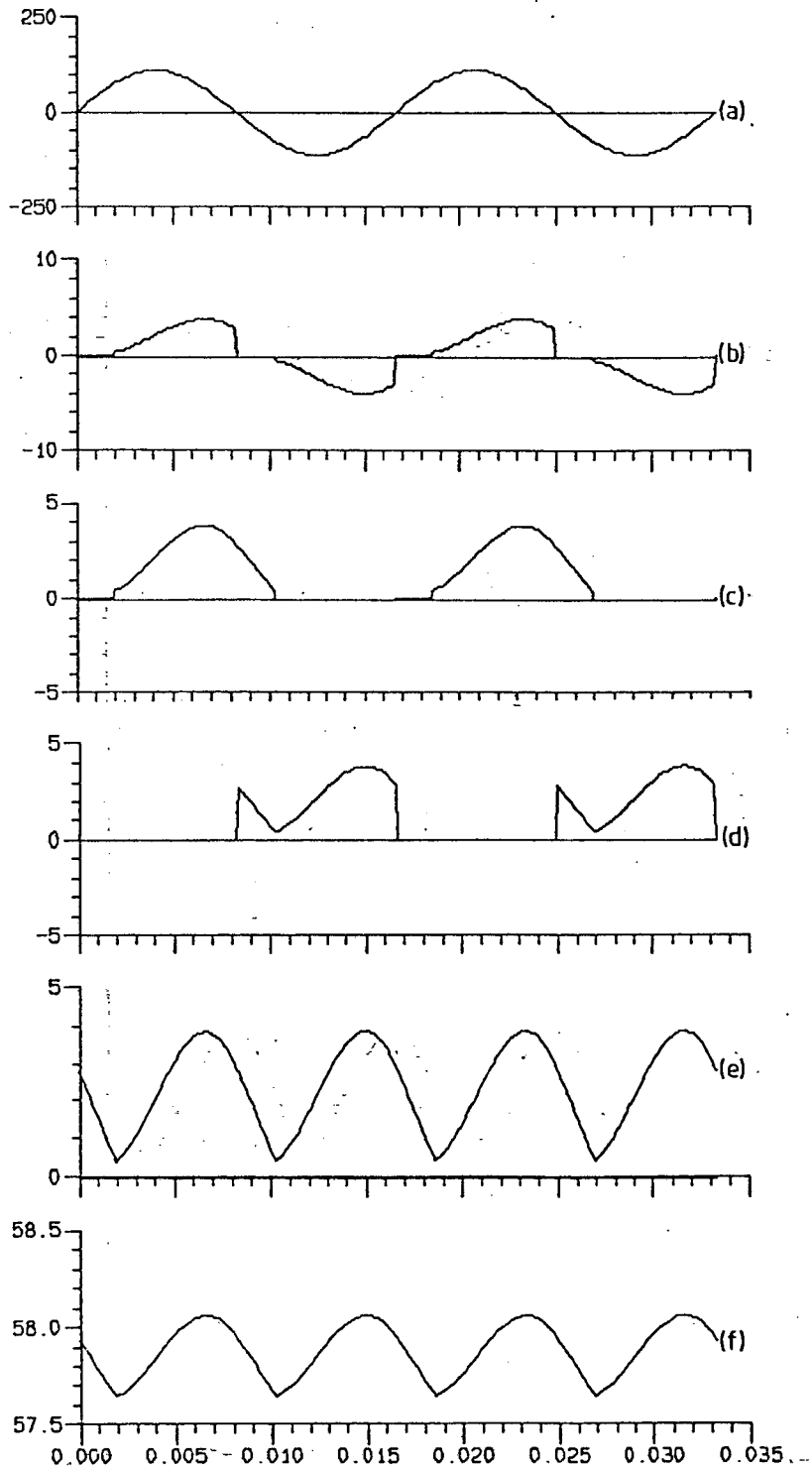


Fig. 2.23 - Formas de Onda mais importantes do Carregador Projetado.

Da simulação do carregador projetado obtivemos as seguintes informações do sistema:

- Taxa de distorção harmônica da curva (b) : $t_{dh}(15) = 30 \% ;$
- Corrente nos tiristores: $I_m = 1,20 \text{ A}$ e $I_{rms} = 1,87 \text{ A};$
- Corrente nos diodos: $I_m = 1,19 \text{ A}$ e $I_{rms} = 1,86 \text{ A};$
- Corrente de recarga: $I_m = 2,38 \text{ A}$ e $I_{rms} = 2,63 \text{ A};$
- Tensão de recarga média: $V_d = 57,9 \text{ V}.$

2.5 - Simulação do Carregador Usado

A simulação [20] foi realizada para a etapa mais crítica do sistema, ou seja, o estado de recarga das baterias. Os valores dos parâmetros do circuito são:

- $u = \sqrt{2} \cdot 70 \cdot \sin wt$
- $L = 22,5 \text{ mH}$
- $R_L = 0,782 \Omega$
- $E = 57,6 \text{ V}$
- $R_i = 0,12 \Omega$
- $f = 60 \text{ Hz}$
- $\alpha = 42 \text{ graus}$

A Figura (2.23), apresenta as formas de onda mais importante do carregador usado:

- (a) Tensão do secundário do transformador;
- (b) Corrente do secundário do transformador;
- (c) Corrente do tiristor T1;
- (d) Corrente do diodo D1;
- (e) Corrente de recarga das baterias;
- (f) Tensão total do banco de baterias.

Da simulação do carregador usado obtivemos as seguintes informações do sistema:

- Taxa de distorção harmônica da curva (b): $t_{dh}(15) = 31\%$;
- Corrente nos tiristores: $I_m = 1,21\text{ A}$ e $I_{rms} = 2,13\text{ A}$;
- Corrente nos diodos: $I_m = 1,21\text{ A}$ e $I_{rms} = 2,13\text{ A}$;
- Corrente de recarga: $I_m = 2,44\text{ A}$ e $I_{rms} = 3,03\text{ A}$;
- Tensão de recarga média: $V_d = 57,9\text{ V}$.

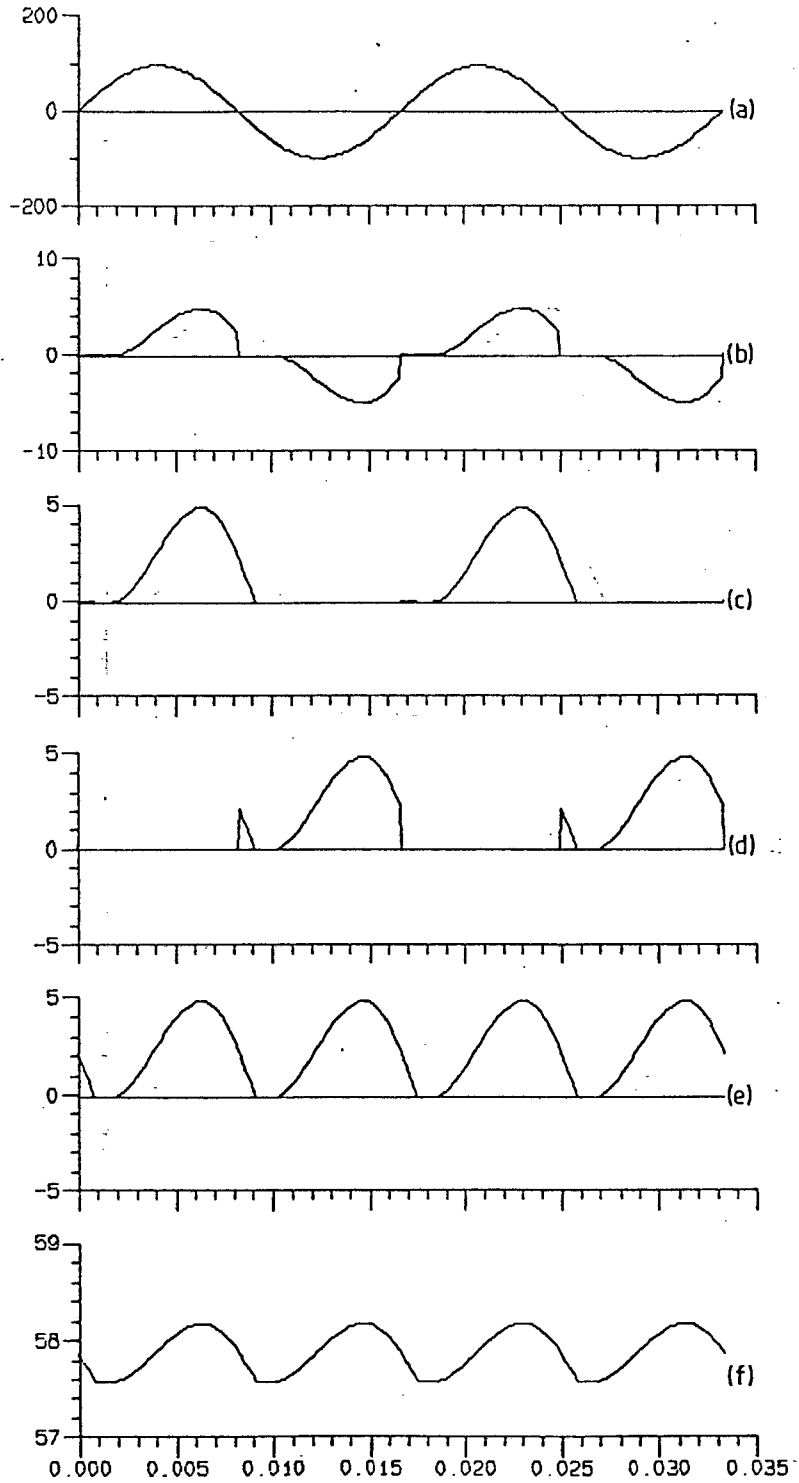


Fig. 2.23 - Formas de Onda mais importantes do Carregador Usado.

2.6 - Conclusão

Obteve-se na realização da simulação do carregador projetado uma condução contínua da corrente de recarga das baterias enquanto, na simulação do carregador usado obteve-se uma condução descontínua.

O projeto do carregador foi realizado para um banco de baterias de 48 V 55 Ah podendo ser expandido para outros bancos com tensão e capacidade maiores.

CAPÍTULO III

DESCRIÇÃO DO SISTEMA E DO PROGRAMA DESENVOLVIDO

3.1 - Introdução

Os microcontroladores tem-se mostrados como dispositivos extremamente flexíveis e indicados para tomada de decisão e monitoramento. Na Figura 3.1 é apresentado o diagrama de blocos do sistema em malha fechada para executar o monitoramento e o controle do banco de baterias. Neste caso, o sistema esta sendo aplicado à uma fonte de alimentação ininterrupta de energia representada pelos blocos do retificador e do inversor. O sistema desenvolvido tem como elementos principais:

- O microcontrolador;
- O carregador;
- O banco de baterias;
- A chave estática;
- O circuito de sincronismo;
- Os circuitos de amplificação e isolação;
- O circuito dos sensores de temperatura, tensão e corrente.

O programa desenvolvido em linguagem assembler, para esse sistema é flexível e permite implementação de algoritmos de controle complexos. Esse programa possibilita também a obtenção de dados do sistema a qualquer momento por meio de um microcomputador utilizado como periférico de entrada e saída.

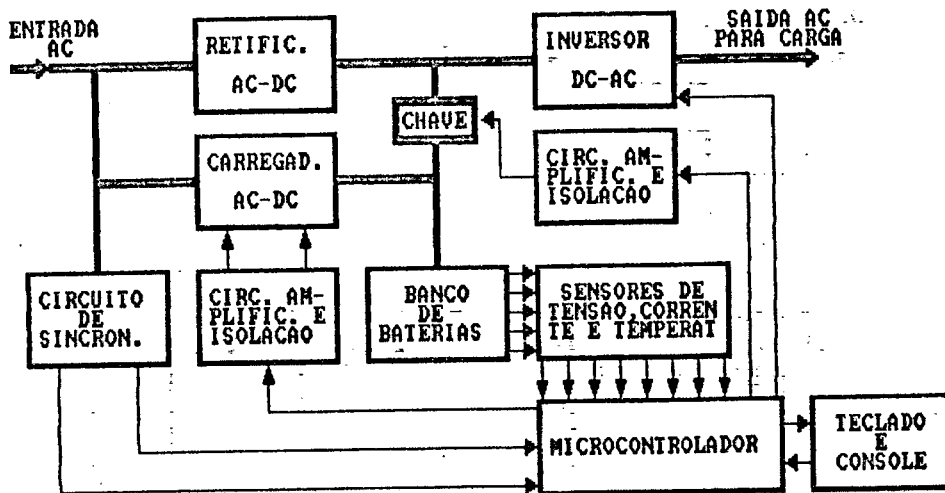


Fig. 3.1 - Diagrama de Blocos do Sistema.

3.2 - Circuito de Sincronismo

O circuito de sincronismo tem como função detectar a passagem por zero volts (inclinação positiva e negativa) e falta de rede, gerando os sinais de interrupção INT0 e INT1 respectivamente, conforme mostra a Figura 3.2.

A interrupção INT0, que é o sinal de sincronismo do sistema é gerado através da comparação entre o sinal da rede retificada e o valor de tensão contínua V_A . O sinal de sincronismo, interrompe o microcontrolador a cada 180 graus da rede para executar a rotina de programação do TIMER0 (temporizador

interno do microcontrolador). Ao acontecer o fim da contagem do TIMER0, é executada a rotina que gera os pulsos de disparo dos tiristores do carregador.

A interrupção INT1, que é o sinal de identificação de falta de rede no sistema é gerado através de uma comparação da tensão da rede retificada e filtrada com o sinal de tensão contínua V_B . O sinal INT1, interrompe o microcontrolador quando ocorrer uma falta de rede executando a rotina que gera o trem de pulsos para o disparo da chave estática (tiristor) ligando assim, o banco de baterias ao inversor.

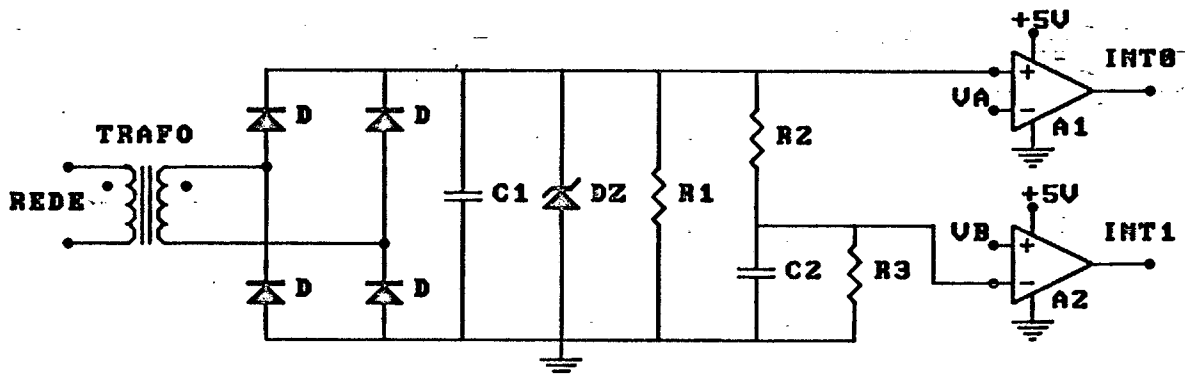


Fig. 3.2 - Circuito de Sincronismo.

A Figura 3.3, apresenta o diagrama dos principais sinais do sistema.

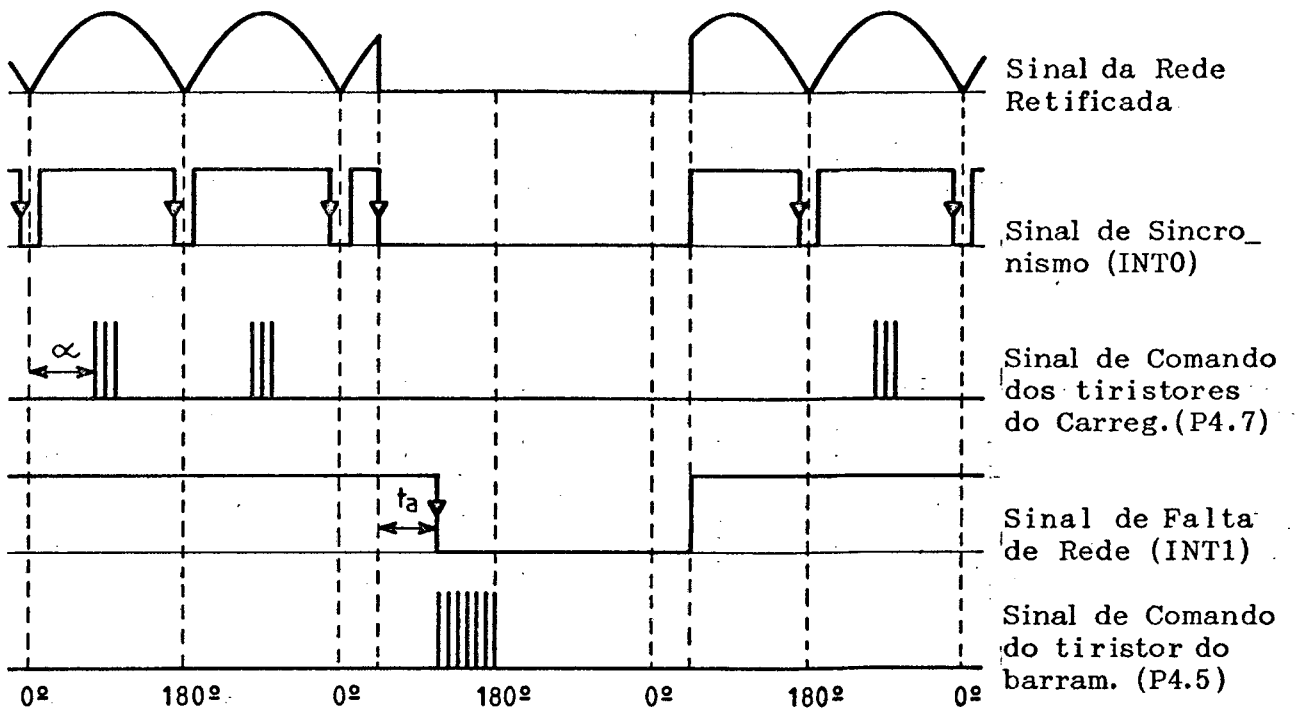


Fig 3.3 - Principais Sinais do Sistema.

3.3 - Circuito de Amplificação e Isolação

Os circuitos de amplificação e isolação tem a finalidade de adequar e isolar o sinal de disparo fornecido pelo microcontrolador, com o valor de corrente de gatilho exigido pelos tiristores.

No acionamento dos tiristores do retificador, o microcontrolador envia através da porta de saída (P4.7) 5 pulsos (frequência de 100 KHz). Já no disparo da chave estática, o microcontrolador envia pela porta de saída (P4.5) um trem de pulsos (frequência de 100 KHz), quando houver uma falha na rede de alimentação. A Figura 3.4 apresenta os circuitos de amplificação e isolação do sistema.

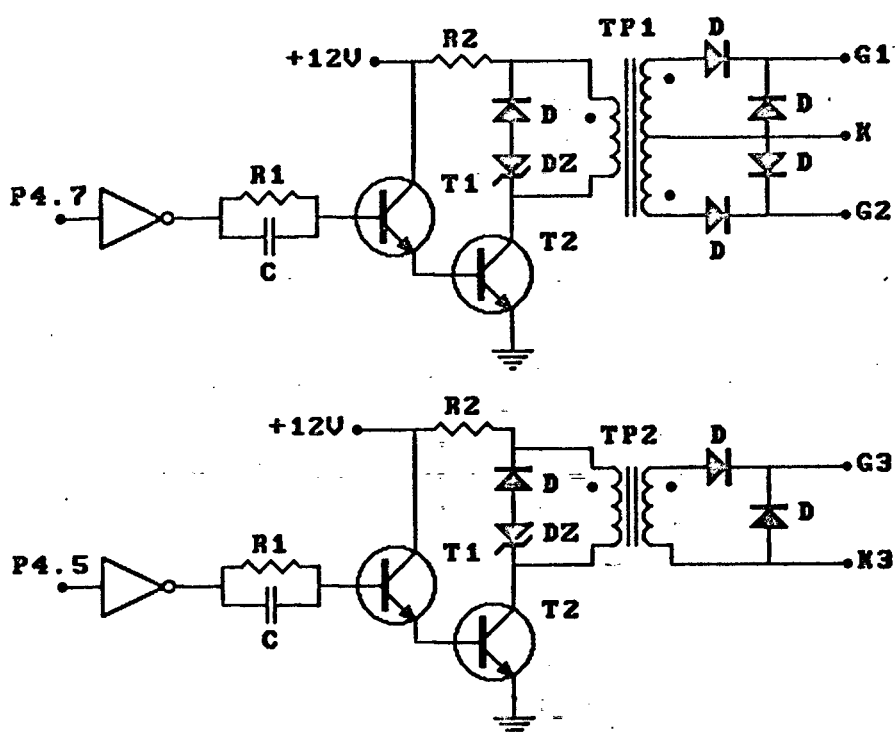


Fig. 3.4 - Circuito de Amplificação e Isolação do Retificador e do Barramento.

3.4 - Circuito do Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura utilizado é um termistor (YSI 44202) com coeficiente de variação negativo. A Figura 3.5 apresenta a curva do ensaio feito em laboratório da resistência versus temperatura deste sensor.

O circuito completo, consta de um divisor resistivo (termistor e resistor de precisão) seguido de um amplificador operacional com o ganho de tensão igual a dois, veja a Figura 3.6. O sinal analógico de tensão V_6 é convertido em digital pelo conversor A/D do microcontrolador e posteriormente comparado com valores de uma tabela criada em memória, com base na curva da Figura 3.5.

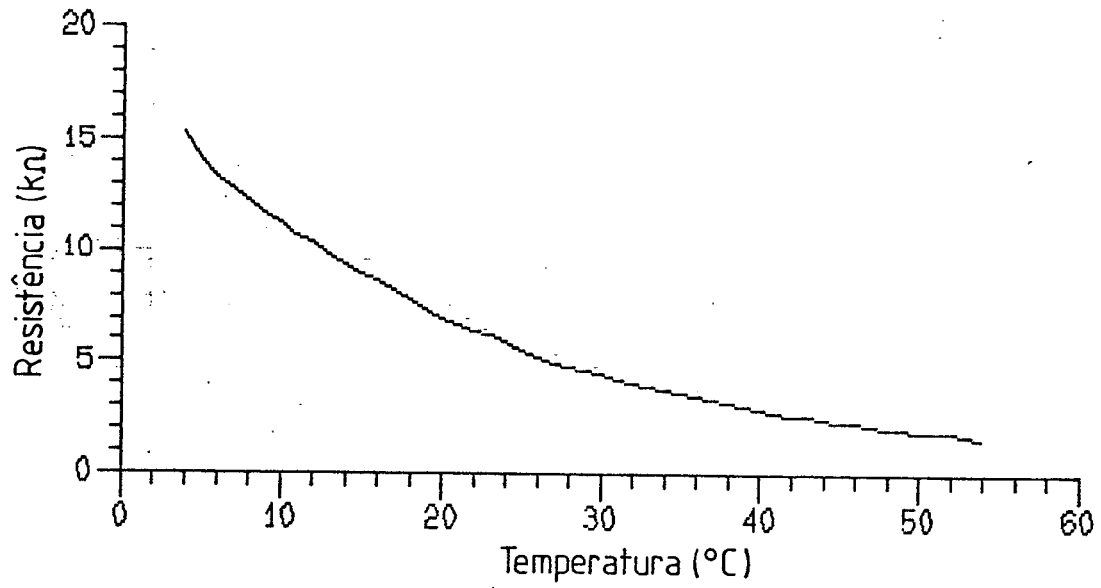


Fig. 3.5 - Curva Resistência versus Temperatura.

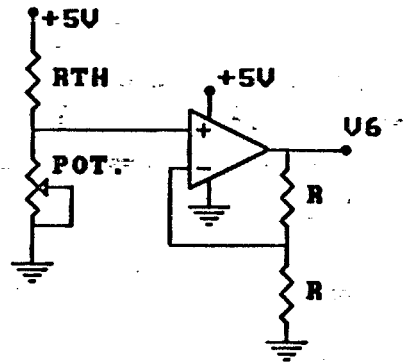


Fig. 3.6 - Circuito do Sensor de Temperatura.

3.5 - Circuito do Sensor de Corrente e Proteção

O sensor usado para fornecer o valor de corrente das baterias é um resistor "shunt" de 5 A - 60 mV, veja a Figura 3.7. O resistor R_3 e o capacitor C_2 na saída do amplificador operacional formam um filtro passa-baixa de primeira ordem para extrair o valor médio da corrente das baterias. O sinal analógico V_5 é convertido em digital pelo conversor A/D do microcontrolador.

A proteção do sistema é acionada quando uma sobrecorrente circular pelo resistor "shunt", saturando o transistor T e resetando o microcontrolador através do sinal de "Reset In". Este sinal de Reset inibi o disparo de todos os tiristores do sistema.

3.6 - Circuito dos Sensores de Tensão

O valor da tensão total, e de cada bateria é fornecido por divisores resistivos, conforme a Figura 3.8. O potenciometro POT1 realiza uma divisão da tensão da bateria B1 por seis, o POT2 realiza uma divisão por doze, o POT3 realiza uma divisão por dezoito e o POT4 realiza uma divisão por vinte e quatro. Os sinais analógicos V_1 a V_4 são convertidos em digital pelo conversor A/D do microcontrolador.

A tensão total e de cada bateria por elemento são calculados depois da conversão A/D, pelo seguinte algoritmo implementado pelo programa: $V_{b1} = V_1$, $V_{b2} = 2.V_2 - V_1$, $V_{b3} = 3.V_3 - 2.V_2$, $V_{b4} = 4.V_4 - 3.V_3$ e $V_{tt} = V_4$.

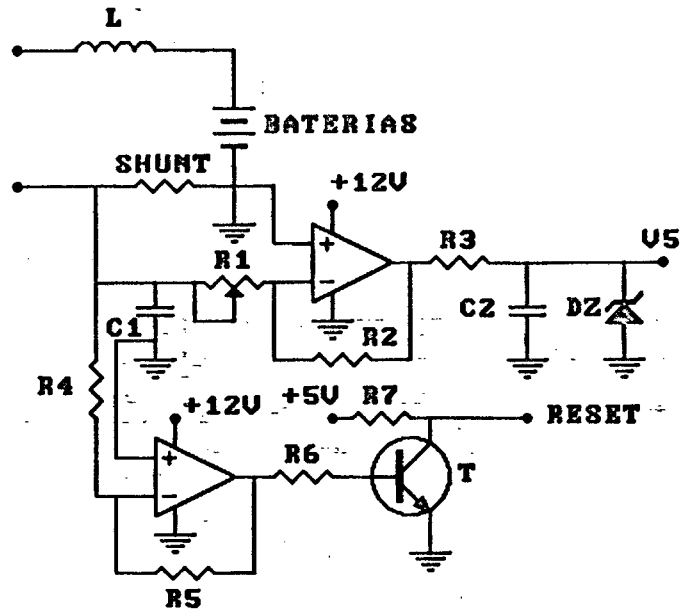


Fig 3.7 - Circuito do Sensor de Corrente e Proteção.

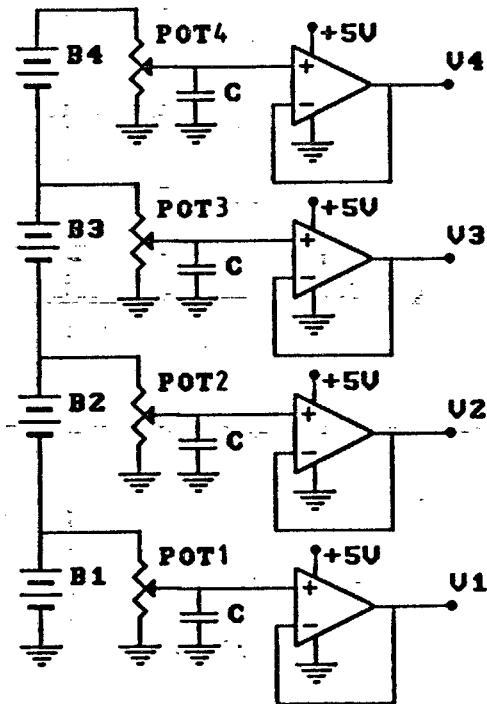


Fig. 3.8 - Circuito dos Sensores de Tensão.

3.7 - O Programa Principal

O programa principal desenvolvido para controle do sistema, é formado das seguintes rotinas:

- Rotina de disparo dos tiristores;
- Rotina de programação do Timer0;
- Rotina de falta de rede;
- Rotina de leitura e proteção;
- Rotina erro/compensador;
- Rotina de teclado;
- Rotina de transmissão ao vídeo.

Para evitar problemas no tempo de execução das rotinas, adotou-se a partição do programa durante um ciclo de rede, conforme mostra a Figura 3.9. No semi-ciclo positivo da rede (SEQ.1) são executadas a rotina de leitura e proteção e a rotina de erro/compensador. Já no semiciclo negativo da rede (SEQ.2) são executadas as rotinas de teclado e de transmissão ao vídeo.

Primeiramente na inicialização, é fornecido ao sistema o valor da corrente de recarga. Logo após, são preparadas as variáveis do sistema, tais como: sequência, ângulo de disparo, programação das portas, habilitação de interrupções e outras.

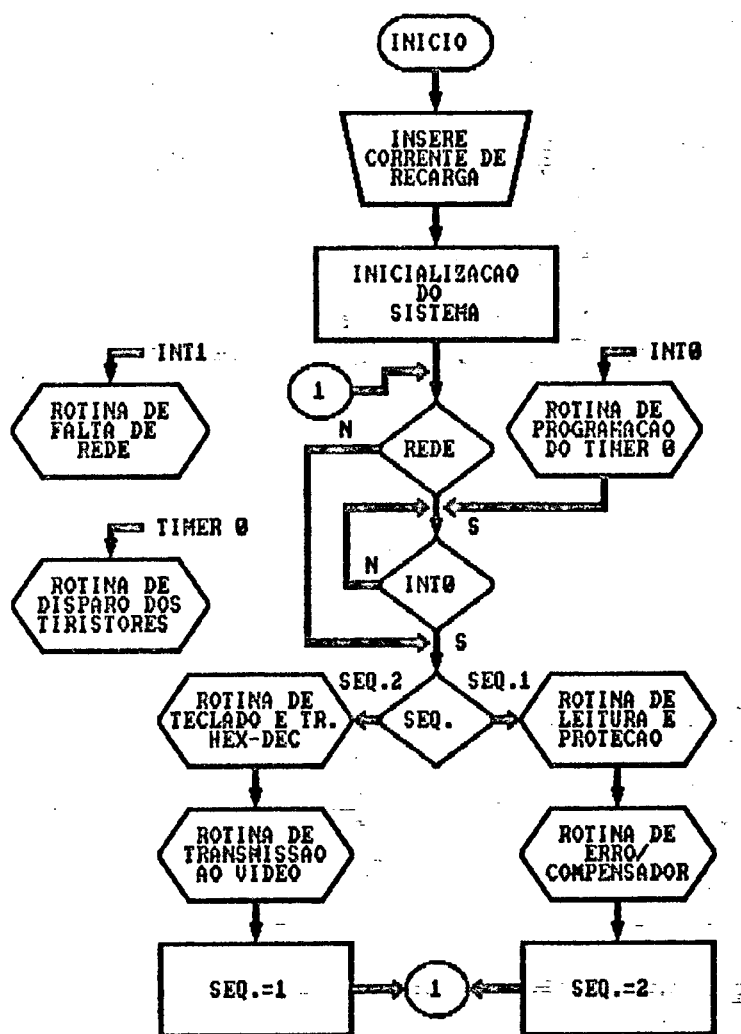


Fig. 3.9 - Programa Principal.

3.8 - Rotinas de Interrupção

São três as interrupções do sistema: Timer0, Int0 e Int1, veja Figura 3.10. O contador (Timer0), realiza uma contagem que pode variar entre 0° e 180° da rede de alimentação. A rotina de programação do contador é feita

na passagem pelo zero de tensão da fonte de alimentação (interrupção Int0), carrega o contador (Timer0), habilita a contagem e registra a presença de rede.

A rotina de disparo dos tiristores do retificador (interrupção Timer0) tem como função estabelecer através de uma porta de saída (P4.7), os pulsos de disparo dos tiristores do carregador.

Na rotina de falta de rede (interrupção Int1) é gerado um trem de pulso através de uma porta de saída (P4.5), para colocar a chave estática em condução e registrar falta de rede.

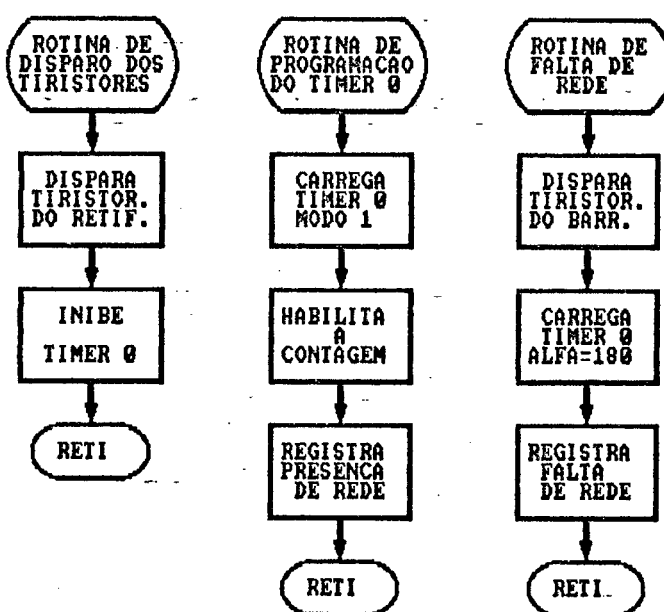


Fig 3.10 - Rotinas de Interrupção.

3.9 - Rotina de Leitura e Proteção

A rotina de Leitura dos dados e proteção do sistema, realiza a conversão A/D de quatro sinais de tensão, um sinal proporcional a corrente e

um sinal proporcional a temperatura, conforme a Figura 3.11 .

Quando houver uma falta de rede, essa rotina compara o valor da tensão total por elemento, com o valor de referência de 1,75 V/e. Se a tensão total por elemento for menor que a referência é registrado o defeito de subtenção das baterias e o inversor é inibido através do sinal de porta de saída (P4.6). Caso contrário, continua o processo de descarga das baterias.

Em presença de rede, essa rotina realiza a habilitação do inversor, podendo registrar sobretensão se a tensão total por elemento for superior a 2,75 V/e, ou registrar sobrecorrente se a corrente das baterias ultrapassar o valor de 4,5 A.

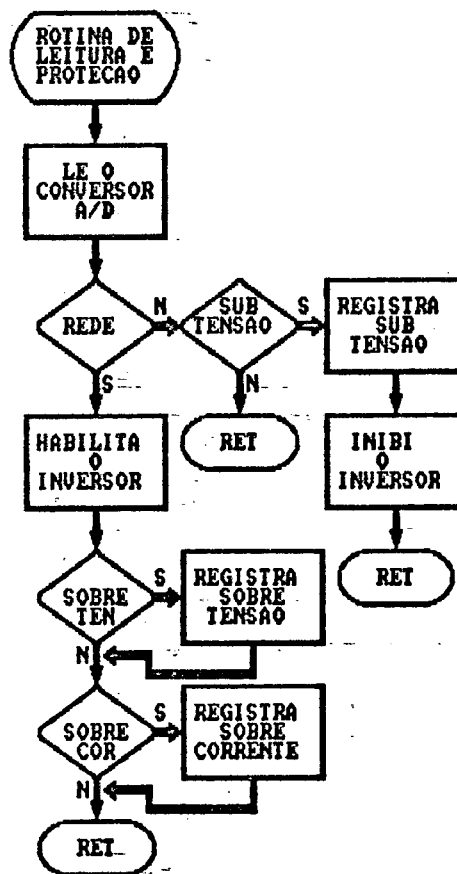


Fig. 3.11 - Rotina de Leitura e Proteção.

3.10 - Rotina Erro/Compensador

O algoritmo de controle somente é executado quando há presença de rede. As tensões de final de recarga e de flutuação são funções da temperatura, conforme mostra a Figura 3.12. O banco de baterias pode estar em um dos quatro estados: em recarga, em flutuação, em descarga ou descarregado.

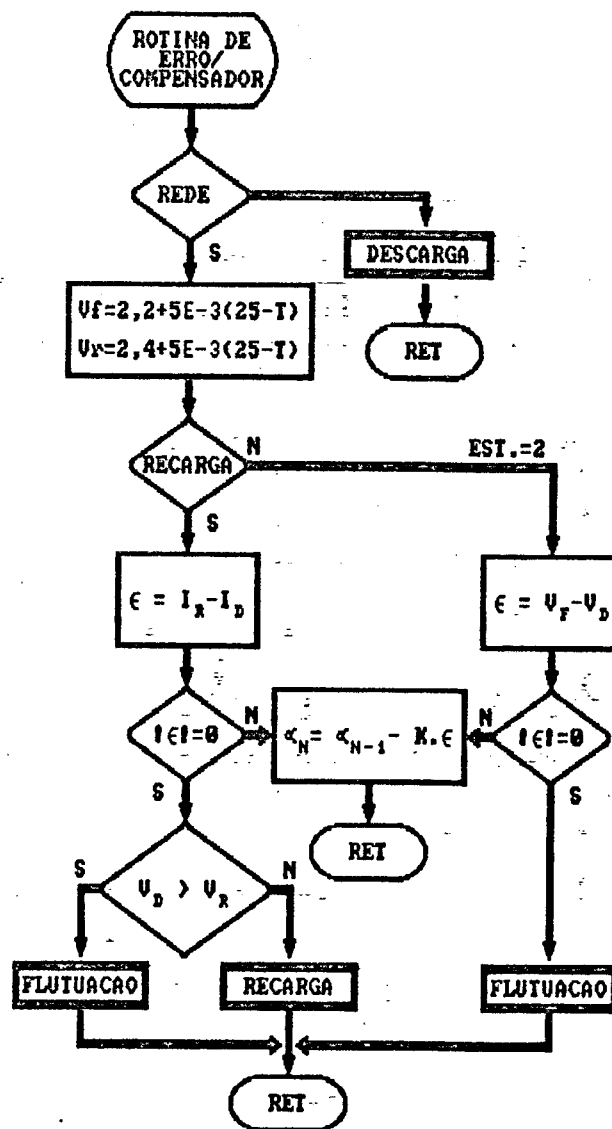


Fig 3.12 - Rotina Erro/Compensador.

No estado de recarga é aplicado uma corrente constante (I_r). Essa corrente é mantida até que o nível de tensão atingir o valor de final de recarga (V_r). O diagrama de blocos do sistema em malha fechada no estado de recarga é apresentado na Figura 3.13.

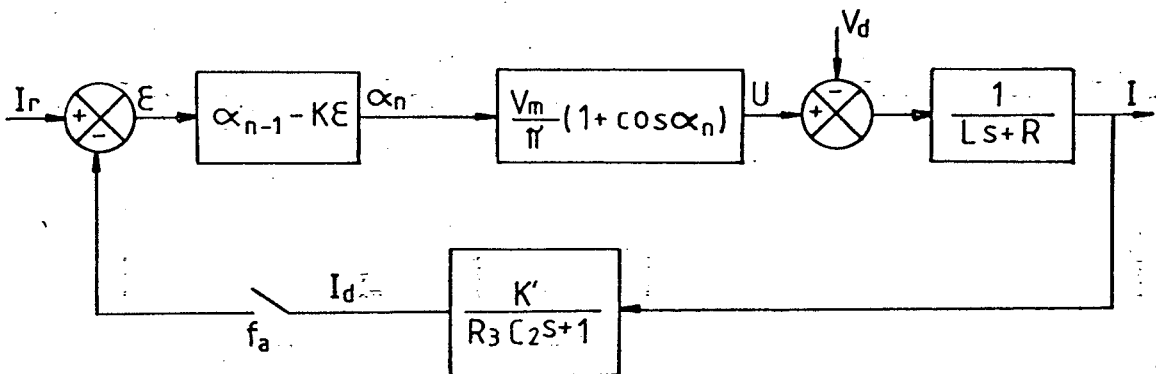


Fig. 3.13 - Diagrama de Blocos do Sistema em Malha Fechada no Estado de Recarga.

No estado de flutuação, é aplicado uma tensão de flutuação (V_f). Essa tensão é mantida, até ocorrer uma falta de rede. O diagrama de blocos do sistema em malha fechada no estado de flutuação, é apresentado na Figura 3.14.

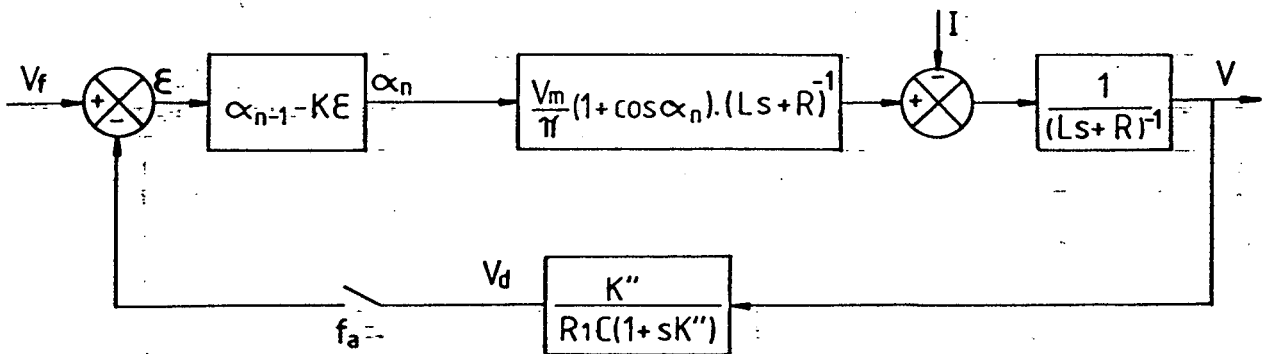


Fig. 3.14 - Diagrama de Blocos do Sistema em Malha Fechada no Estado de Flutuação.

Estabilidade e desempenho transitório de um sistema de controle em malha fechada estão diretamente relacionados com a configuração dos pólos e zeros de malha fechada no plano complexo. Os pólos de malha fechada nos estados de recarga e flutuação estão no semiplano esquerdo do plano complexo, garantindo a estabilidade deste sistema.

3.11 - Rotina de Teclado e Transmissão ao Vídeo

A rotina de teclado e transmissão ao vídeo gerencia a entrada e a saída de informações entre o operador e o sistema, conforme as Figuras 3.15 e 3.16. Na rotina de teclado, algumas teclas tem funções específicas, tais como:

- Tecla 0 : reinicia o sistema.
- Tecla 1 : mostra a tensão da bateria 1.
- Tecla 2 : mostra a tensão da bateria 2.
- Tecla 3 : mostra a Tensão da bateria 3.
- Tecla 4 : mostra a Tensão da bateria 4.
- Tecla 5 : mostra a Tensão total das baterias.
- Tecla 6 : mostra a corrente das baterias.
- Tecla 7 : mostra a temperatura das baterias.

A rotina de transmissão ao vídeo, além de enviar os valores de tensão, corrente e temperatura solicitados via teclado, também transmite mensagens importantes, tais como: presença de rede, falta de rede, subtensão nas baterias, sobretensão nas baterias e sobrecorrente nas baterias.

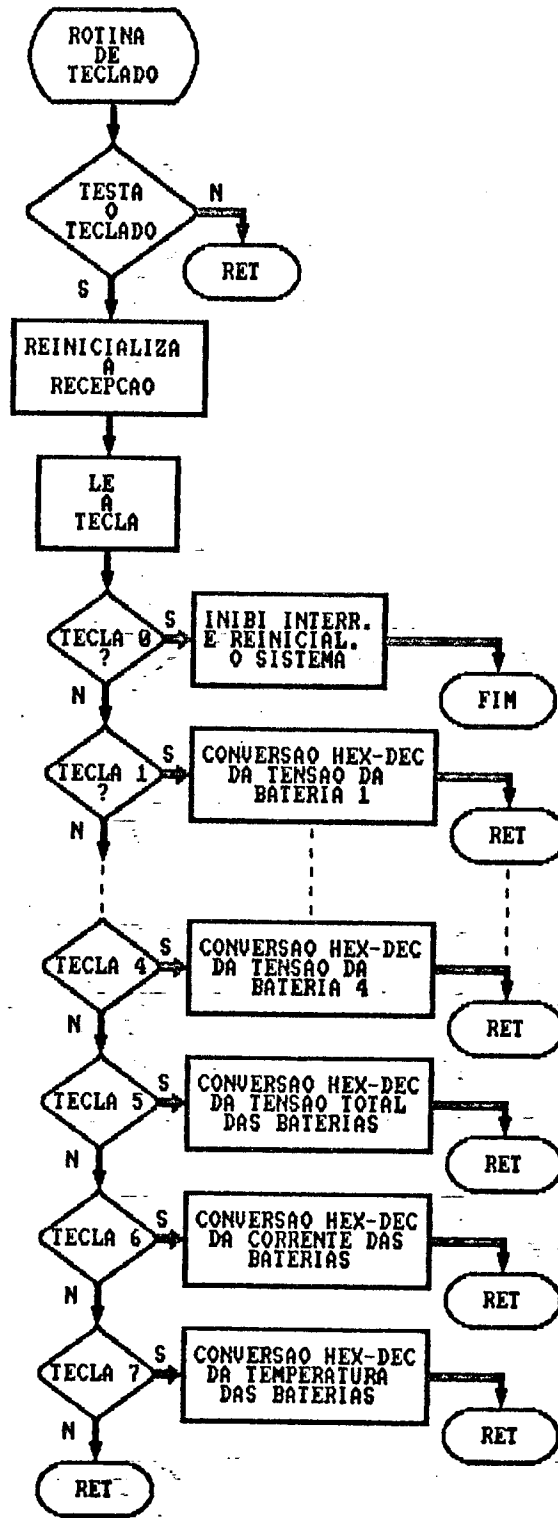


Fig. 3.15 - Rotina de Teclado.

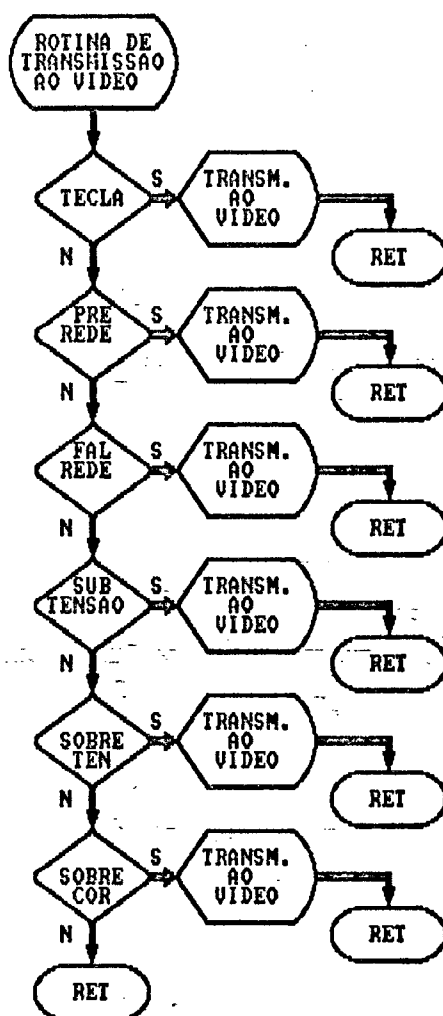


Fig. 3.15 - Rotina de Transmissão ao Vídeo.

3.12 - Conclusão

O comando e o controle baseou-se no uso do microcontrolador pela facilidade de implementação das leis de controle do carregador e pela flexibilidade proporcionada por ele.

Qualquer microcontrolador da família 8031 poderia ser usado no controle e monitoração do banco de baterias. Optou-se pelo 80535 pelo fato deste microcontrolador apresentar uma série de vantagens em relação aos outros, tais como: conversor A/D interno com oito entradas analógicas multiplexadas, doze fontes de interrupção com quatro níveis de prioridade, três temporizadores/contadores de dezesseis bits programáveis, etc...

CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 - Introdução

O sistema opera em malha fechada na recarga e na flutuação das baterias, com possibilidade de escolha do valor da corrente de recarga.

Utilizou-se um banco de baterias de 48 V 55 Ah contendo, quatro unidades de seis elementos.

Os resultados obtidos em diversos ensaios de laboratório são apresentados e discutidos a seguir.

4.2 - Carga das Baterias

Antes de executar o processo de carga do banco de baterias foi realizada a descarga das baterias até alcançar a tensão de 1,76 V/e.

A Figura 4.1 mostra a corrente e a tensão durante a carga do banco de baterias. A corrente mantém-se constante ($C/27,5 = 2,0$ A) durante a recarga, vai a zero na transição do estado de recarga para a flutuação, cresce e decresce até um certo valor (corrente de flutuação) no segundo estado. A

tensão do banco de baterias cresce durante a recarga até um determinado valor (2,42 V/e), decresce na transição do estado de recarga para a flutuação e mantém-se constante (2,20 V/e) no estado de flutuação.

A temperatura das baterias manteve-se em 26 °C e o tempo de recarga foi de 17 horas.

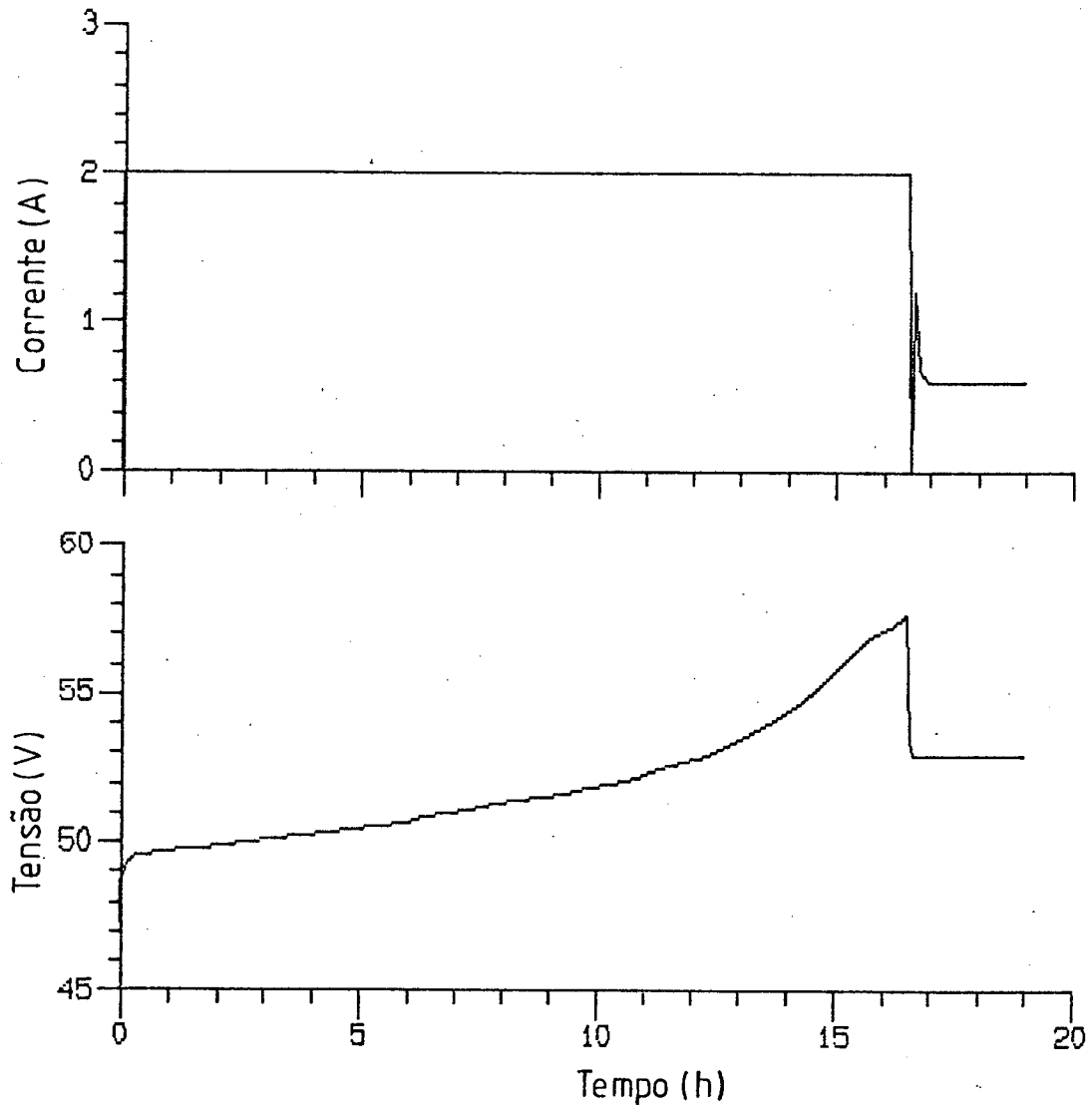


Fig. 4.1 - Corrente e Tensão do Banco de Baterias em Função do Tempo de Carga.

Na Figura 4.2 são apresentados as tensões das quatro baterias que compõem o banco durante a carga. Observa-se nestes gráficos uma grande semelhança na evolução das tensões nas baterias.

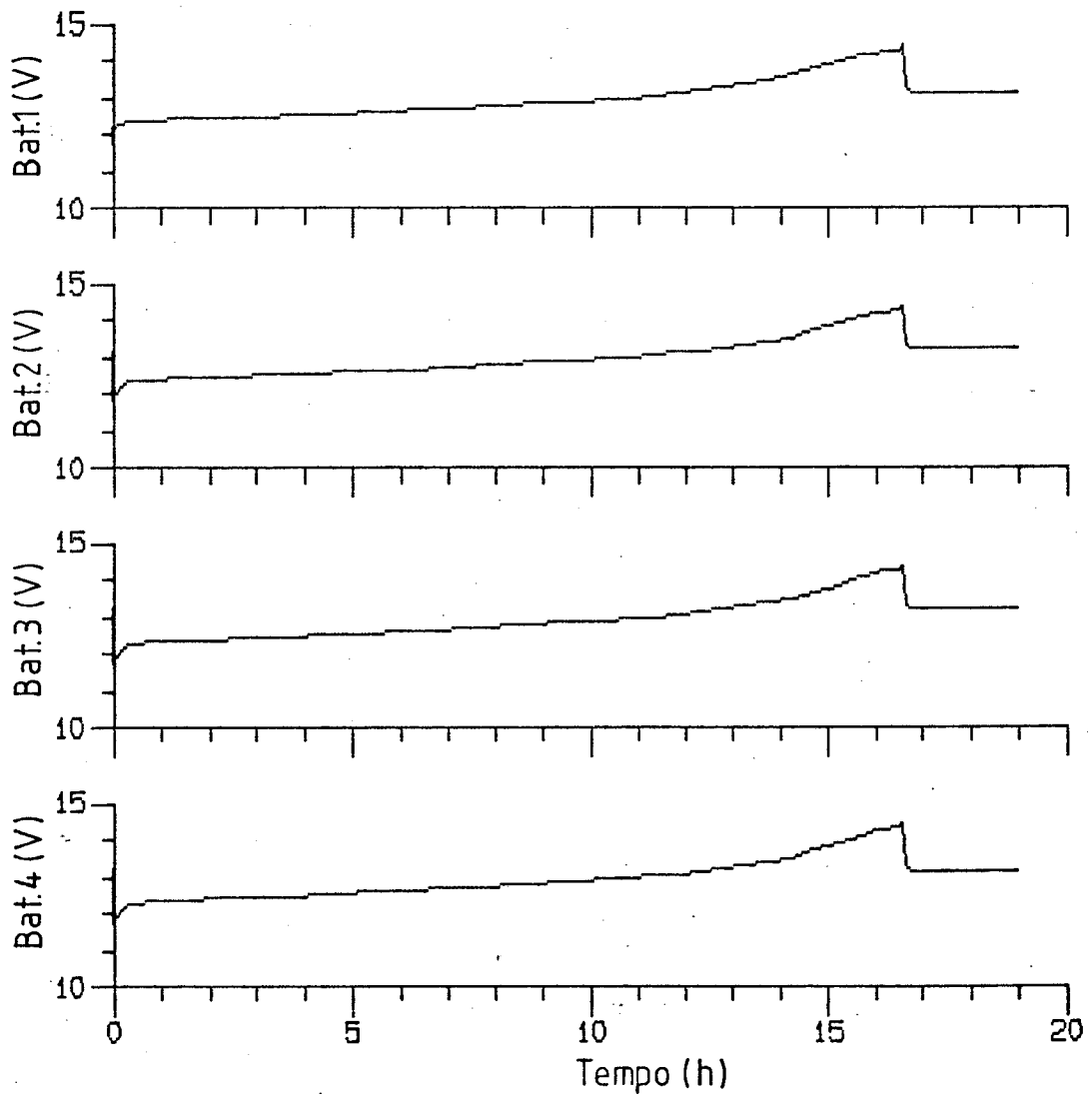


Fig. 4.2 - Tensão das Baterias em Função do Tempo de Carga.

A Figura 4.3 mostra as formas de onda da tensão do banco de baterias e da corrente de carga no final do estado de recarga. A corrente

média é de 2,0 A (C/27,5) em regime descontinuo e a tensão média aplicada é de 57,0 V.

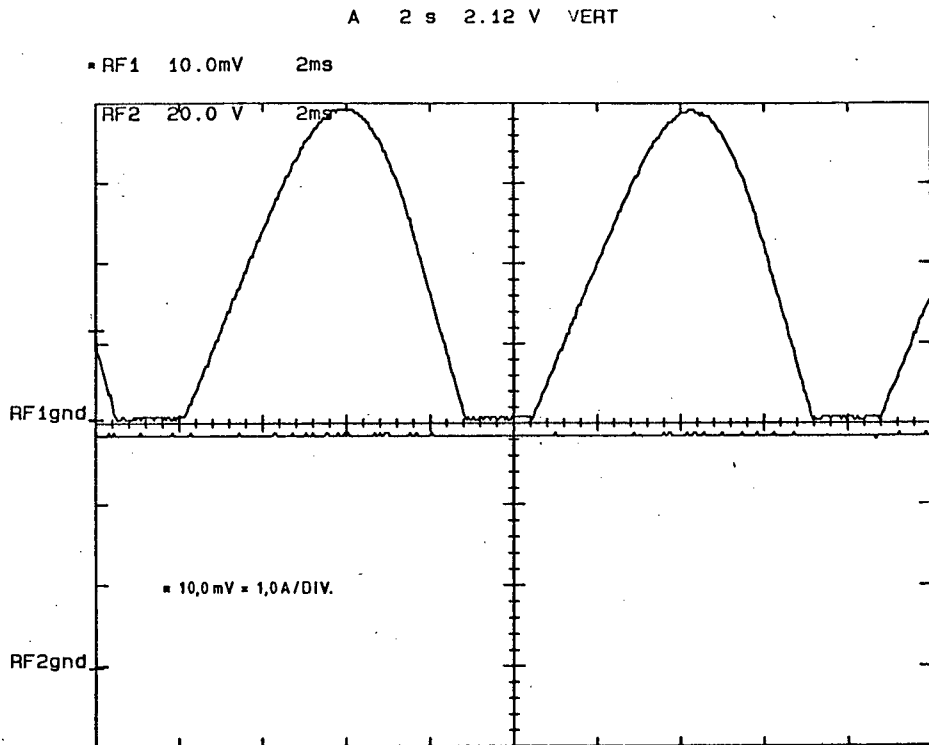


Fig. 4.3 - Formas de Onda da Corrente de Carga e da Tensão do Banco de Baterias.

4.3 - Descarga das Baterias

Após o processo de carga foi realizado o ensaio de descarga do banco de baterias com temperatura ambiente de 24 °C através de uma carga resistiva e constante. A Figura 4.4 mostra a tensão e a corrente durante a descarga do banco de baterias. A tensão foi decrescendo até o valor de 1,76 V/e, neste ponto foi interrompido o ensaio de descarga das baterias.

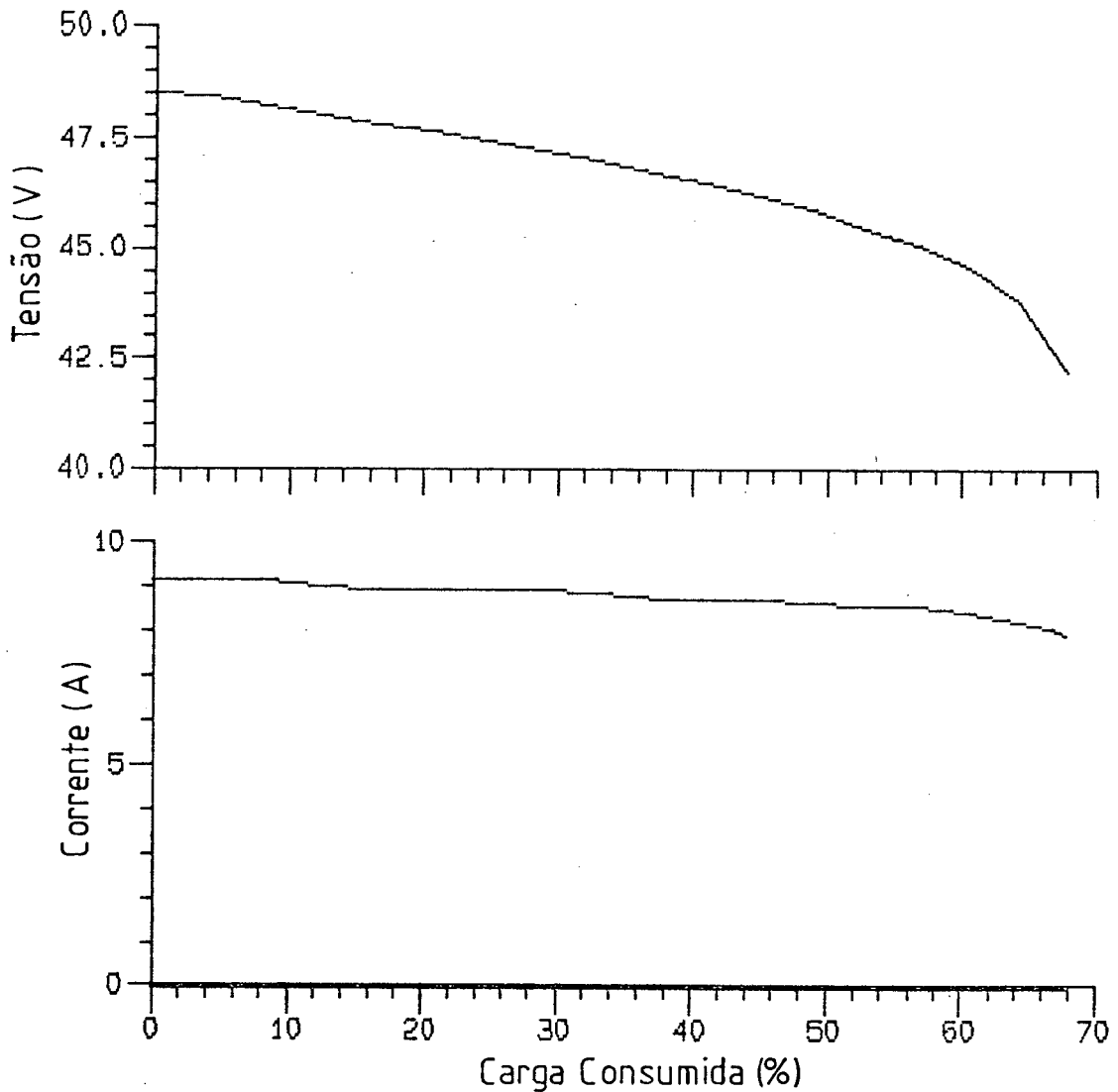


Fig. 4.4 - Tensão e Corrente de Descarga do Banco de Baterias em Função do Percentual de Carga Consumida.

Na Figura 4.5 são apresentados as tensões das quatro baterias que compõem o banco durante a descarga. Nota-se que as baterias 2 e 4 tiveram suas tensões de final de descarga menores que as baterias 1 e 3. A menor tensão alcançada foi de 10 V (1,66 V/e) na bateria 4.

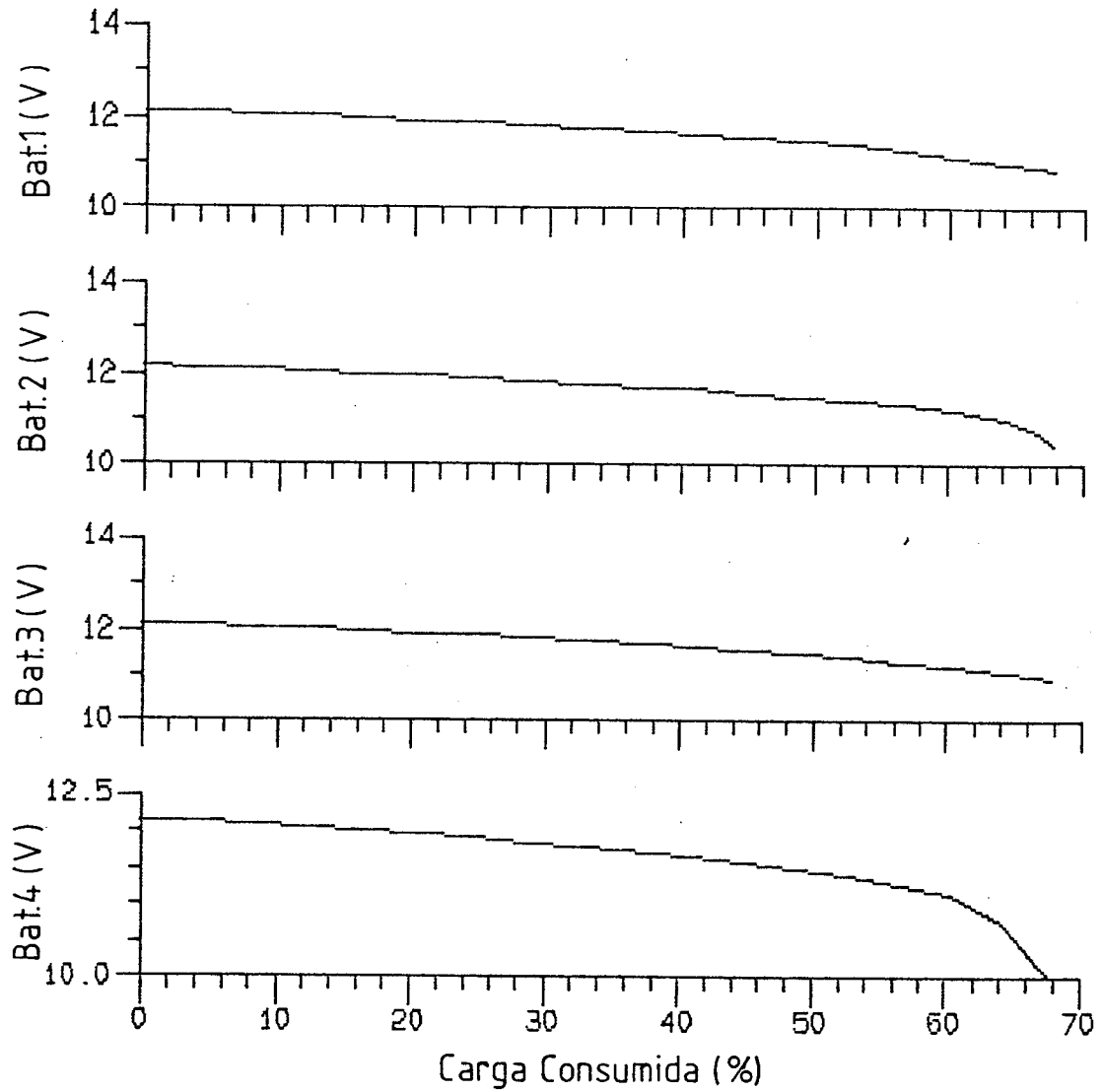


Fig. 4.5 - Tensão das Baterias em Função do Percentual de Carga Consumida.

A Figura 4.6 apresenta a variação da resistência do banco de baterias durante o ensaio de descarga. Verifica-se que a resistência tem um aumento bastante significativo no final do processo de descarga.

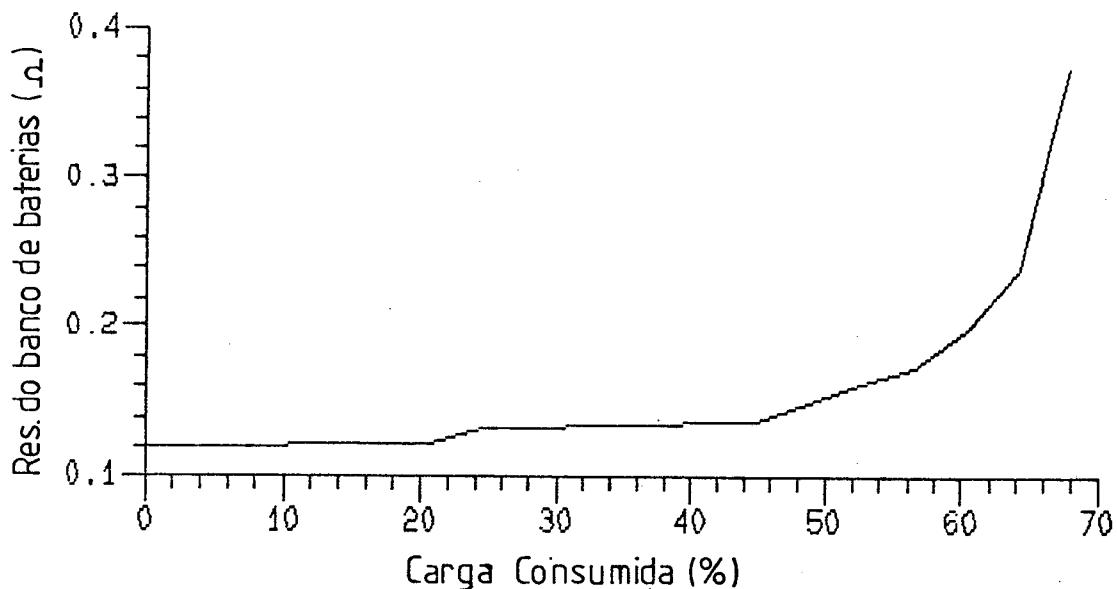


Fig. 4.6 - Resistência do Banco de Baterias em Função do Percentual de Carga Consumida.

4.4 - Resposta Transitória do Sistema

Em muitos casos práticos, as características de desempenho desejadas do sistema de controle são especificadas em termos da resposta transitória para uma entrada em degrau da grandeza de referência.

O sistema de controle usado possui duas respostas transitórias:

- Resposta transitória da corrente no início do estado de recarga;
- Resposta transitória da tensão na passagem do estado de recarga para o de flutuação.

4.4.1 - Resposta Transitória da Corrente

O compensador de ação integral usado para controlar o valor da corrente de recarga das baterias, possui a seguinte equação:

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} - k \cdot \epsilon$$

A Figura 4.7 apresenta as respostas transitórias da corrente para diferentes valores de "k".

Para $k = 1$ e $k = 2$, temos um sistema subamortecido e sem oscilações. Com $k = 1$, temos um tempo de acomodação maior e um sobre-sinal máximo menor que a resposta transitória da corrente para $k = 2$.

Com $k = 0,5$, não temos sobre-sinal, mas em compensação, temos um tempo de subida muito maior que $k = 1$ e $k = 2$.

4.4.2 - Resposta Transitória da Tensão

O compensador de ação integral usado para controlar o valor da tensão de flutuação do banco de baterias possui a mesma expressão do compensador usado para controlar o valor da corrente de recarga.

A Figura 4.8 mostra a resposta transitória da tensão para $k = 1$. Verifica-se que a tensão do banco de baterias decresce lentamente.

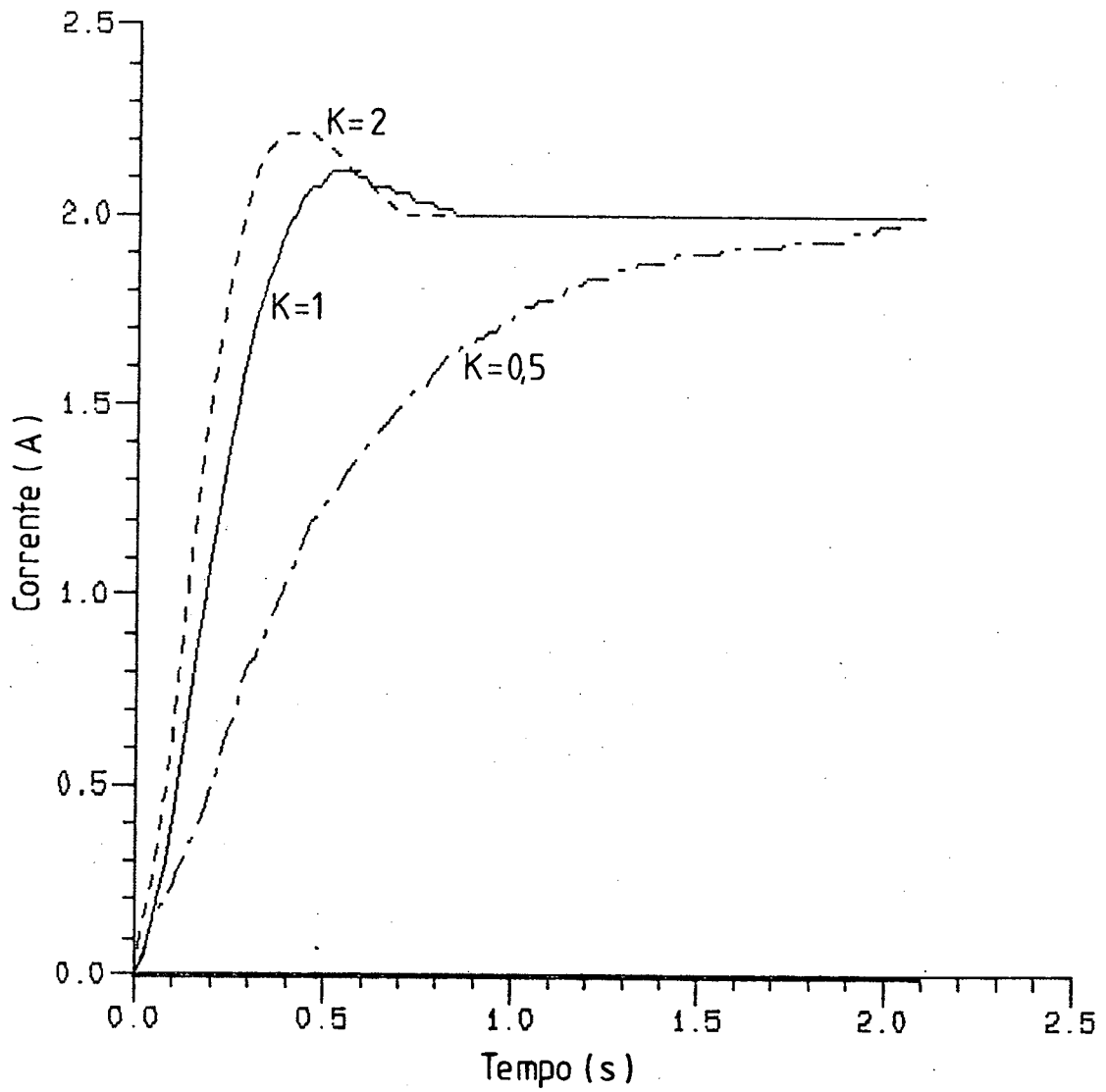


Fig. 4.7 - Resposta Transitória da Corrente para $k = 0,5$, 1 e 2.

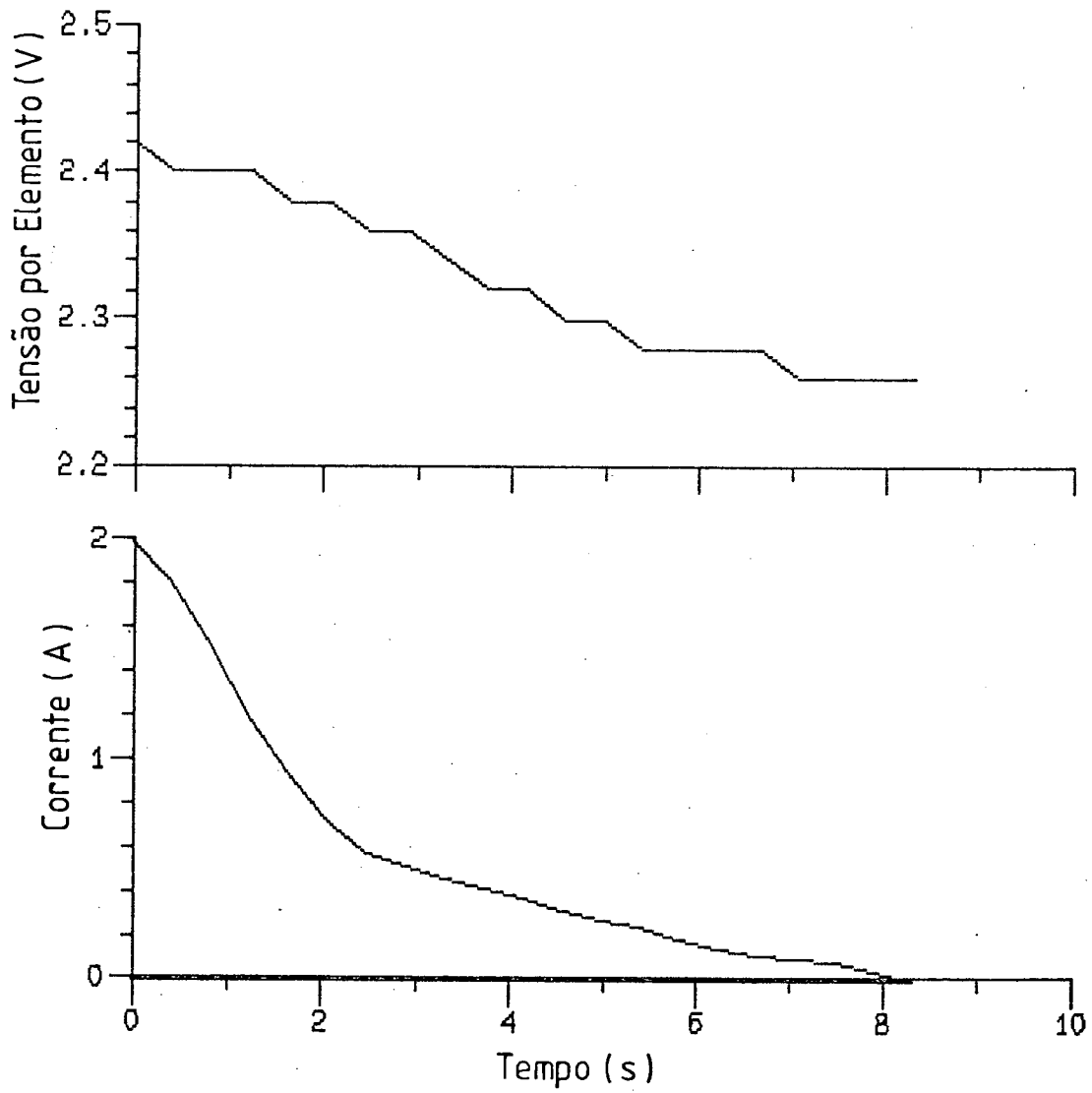


Fig. 4.8 - Resposta Transitória da Tensão para $k = 1$.

4.5 - Resposta à Falta de Rede

A Fig. 4.9 apresenta a resposta do sistema a uma falta de rede. Observa-se que o sistema de controle leva aproximadamente 4 ms para reconhecer esta falta e acionar o banco de baterias ao resto do sistema através da chave estática.

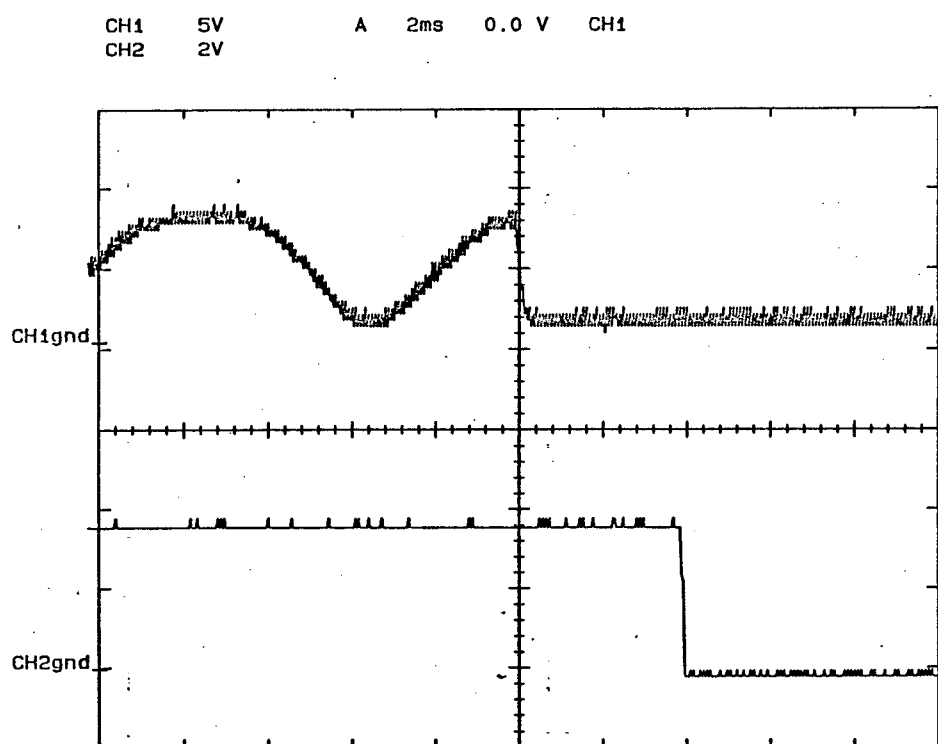


Fig. 4.9 - Resposta do Sistema de Controle a uma Falta de Rede.

4.6 - Conclusão

A grande flexibilidade do microcontrolador 80535 permite a implementação de qualquer tipo de algoritmo de controle em malha fechada no processo de carga das baterias.

Os resultados obtidos, foram próximos dos resultados esperados. O sistema apresenta uma boa resposta aos transitórios de partida e de mudança de estado devido a boa performance do compensador utilizado.

CONCLUSÕES

O sistema de controle de carga e descarga foi testado em um banco de baterias de 48 V 55 Ah, para varias situações de operação. Mostrou-se robusto, confiável e flexível, já que através do programa desenvolvido pode-se alterar suas características, adequando-se à aplicação desejada.

O sistema microcontrolado usado para executar o controle da carga e a monitoração das descargas evita que sobre-cargas e descargas profundas sejam realizadas no banco de baterias, proporcionando com isso, um aumento da vida útil das baterias.

A redução da capacidade das baterias em temperaturas baixas e a sobre-carga em temperaturas elevadas são minimizados pela utilização do microcontrolador no controle do método de carga. Este algoritmo realiza a correção das tensões de final de recarga e de flutuação em função da temperatura.

Na descarga, foi consumido mais de 67% da capacidade total do banco de baterias até a tensão alcançar o valor de 1,76 V/e. Este fato comprova a eficiência do método de carga empregado.

A resposta transitória da corrente no sistema para $K = 1$, apresenta um sobre-sinal máximo menor que 10% do valor de referência ($C/27,5 = 2,0$ A), um tempo de acomodação de aproximadamente 0,8 s e um tempo de subida menor que 0,3 s.

A resposta transitória da tensão no sistema para $K = 1$, possui um tempo de acomodação grande devido ao erro da tensão ser muito pequeno. Pode-se evitar este problema aumentando o ganho do compensador, por outro lado, esta resposta transitória lenta não prejudica o funcionamento deste sistema.

Em aplicações em que o número de baterias ligadas em série for grande, existe a necessidade de um maior número de entradas analógicas na conversão A/D. Neste caso, pode-se usar um microcontrolador que possua um maior número de entradas analógicas multiplexadas ou utilizar conversores tensão/frequência juntamente com o microcontrolador para executar a medição das variáveis do sistema.

O sistema desenvolvido pode ser utilizado para realizar ensaios de carga e descarga em baterias ou banco de baterias através da gravação dos dados de tensões, corrente e temperatura em memória. A função descrita pode ser executada pela simples implementação de uma rotina de aquisição destes dados ao programa já desenvolvido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PINHEIRO, J.R., GRÜNDLING, H.A. e BONACORSO, N.G. - Controlador de Velocidade de Motores de Indução Trifásicos à Microprocessador - II Seminário de Eletrônica de Potência, p.139 - 146, Florianópolis, 1989.
- [2] CAPELATO, M.D. - Estudo da Viabilidade de Células Eletroquímicas de Chumbo- dióxido de Chumbo em Sais Solúveis de Chumbo - Tese de Doutorado USP, 1988.
- [3] CASTELLAN, G.W. - Physical Chemistry - World Student Series Edition, 1972.
- [4] GRAY, A. - Eletrotécnica Princípios e Aplicações - Editora Livros Técnicos e Científicos, 1978.
- [5] SAB NIFE - Manual de Operações e Manutenção de Baterias Ácidas.
- [6] SATURNIA - Manual de Instalação, Operação e Manutenção de Baterias Estacionárias Chumbo-Ácidas.
- [7] MIGLIARO, M. W. - Maintaining Stationary Batteries - IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA - 23, n.º 4, p. 765 - 772, 1987.

- [8] UNITRODE CORPORATION - Improved Charging Methods for Lead-Acid Batteries Using the UC3906 - Application Note U-104, p. 261 - 272, 1987 -1988.

- [9] BARBI, I. - Eletrônica de Potência - Editora UFSC, 1986.

- [10] LANDER, C.W. - Eletrônica Industrial: teoria e aplicações - Editora McGraw - Hill, 1988.

- [11] BURMENKO, M. - Practical Design Estimation of the Output Filter for Half - Controlled Thyristor Converters in Power Supply and Battery Charger Applications - APEC' 1986.

- [12] IEEE Orange Book - Emergency and Standby Power - Cap.V, 1987.

- [13] NOWOROLKI, Z., NOWOROLKI, J.M. and BENNETTE, C. A. - A Microcomputer Based UPS Battery Management System - APEC' -p. 475 - 479, 1991.

- [14] PRIEGNITZ, R.A. - Comparing Battery Back up Units - APEC' - p. 480 - 483, 1991.

- [15] CRISTEA, P., TUDUCE, R. and CRACIUNESCU, A. - Microcomputer Assisted System for Testing UPS Batteries - Power Quality - p.239 - 245, 1990.

- [16] SIEMENS - Microcomputer Componentes SAB 80C515 / SAB 80C535, 1990.

- [17] DESHPANDE, S.L. - The Battery Market - APEC' - p. 230 - 235, 1991.

- [18] GEVER, W. - Increasing Battery Life Time by Independent Cell Monitoring - 24th ISATA - p. 1 - 6, 1991.
- [19] CUNHA, A. D. - Comando de um Inversor Trifásico com Modulação PWM Otimizada Utilizando Microprocessador - Dissertação de Mestrado, UFSC, 1988.
- [20] SOUZA, A. F. e MARTINS, D. C. - Manual de Utilização do Programa SCVOLT (Simulação de Conversores Estáticos pelo Método Voltímetro) - Publicação Interna, UFSC, 1990.

ANEXO

O Microcontrolador 80535

O microcontrolador 80535 é um novo membro da família dos microcontroladores 8051 de 8 bits. A pastilha do microcontrolador 80535 contém um único substrato de silício de 68 pinos contendo todos os elementos necessários para a formação de um microcomputador.

As principais características do microcontrolador 80535 são:

- CPU de 8 bits;
- 256 bytes de memória RAM interna;
- 6 portas de 8 bits bidirecionais;
- 3 timer/counters de 16 bits programáveis;
- Canal Serial " full - duplex ";
- Conversor A/D de 8 bits, com 8 entradas multiplexadas;
- 12 fontes de interrupção com 4 níveis de prioridade;
- Processador Boleano;
- Ciclo de instrução 1 μ s;
- Multiplicação e Divisão em 4 μ s;
- Conversão A/D em 13 μ s;
- Endereçamento de bits ou bytes.

Na Figura A.1 é apresentado o diagrama de blocos do microcontrolador 80535.

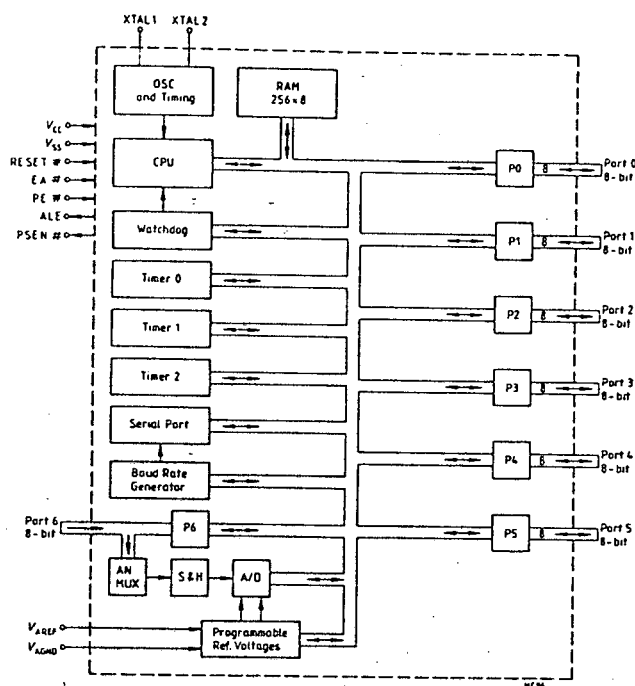


Fig. A.1 - Diagrama de Blocos do Microcontrolador 80535.

Observa-se no diagrama de blocos da Figura A.1 as principais funções do microcontrolador 80535, onde se destacam:

1 - Operação das Portas

O 80535 possui 48 linhas de E/S organizadas em 6 portas de 8 bits. Cada porta do 80535 é constituída internamente por latches, um driver de saída e um buffer de entrada. As portas P0 e P2 são usadas para acessar memórias externa sendo que na porta P2 é colocado o byte mais significativo da palavra

de endereço e na porta P0 é colocado o byte menos significativo e o byte de dados a ser lido ou escrito na memória, multiplexados no tempo. A configuração das portas como entrada e saída é feita por software.

Os pinos das portas P1 e P3 são multifuncionais. Eles possuem as seguintes funções:

- P1.0 - Interrupção Externa 3.
- P1.1 - Interrupção Externa 4.
- P1.2 - Interrupção Externa 5.
- P1.3 - Interrupção Externa 6.
- P1.4 - Interrupção Externa 2.
- P1.5 - Entrada do Timer 2 Externo.
- P1.6 - Saída do Clock do Sistema.
- P1.7 - Entrada do Counter 2.
- P3.0 - Entrada Serial.
- P3.1 - Saída serial.
- P3.2 - Interrupção Externa 0.
- P3.3 - Interrupção Externa 1.
- P3.4 - Entrada do Timer / Counter 0.
- P3.5 - Entrada do Timer / Counter 1.
- P3.6 - Strobe de Escrita.
- P3.7 - Strobe de Leitura.

2 - Conversão A/D

O conversor A/D do 80535 é de 8 bits, com 8 entradas analógicas

multiplexadas (P6) e utiliza o método de aproximação sucessiva. As referências internas de tensão do conversor A/D são programáveis em 16 níveis. Esta característica possibilita uma conversão com menores referências internas de tensão e uma melhor resolução. A Figura A.2, mostra o diagrama de blocos do conversor A/D.

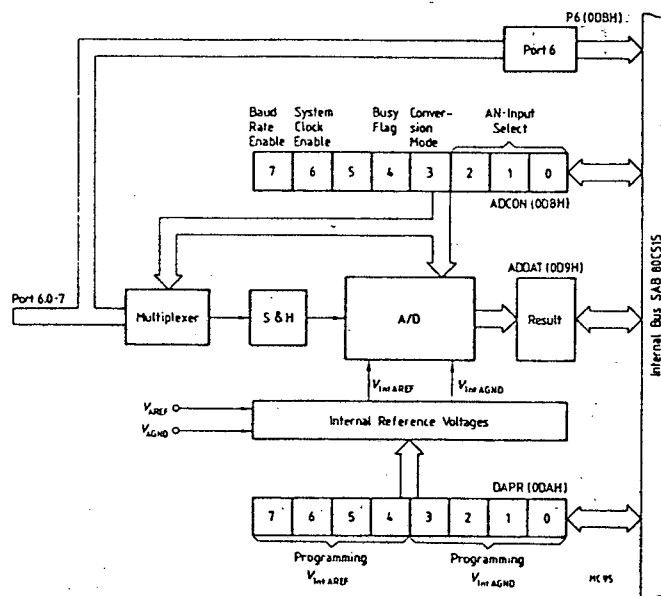


Fig. A.2 - Diagrama de Blocos do Conversor A/D.

3 - Temporizadores / Contadores

O microcontrolador 80535 contém três timer/counters de 16 bits que através de um bit de controle são configurados como timer ou como counter. Na função de timer o registrador é incrementado a cada ciclo de máquina (1/12 da frequência do oscilador). Como counter o registrador será incrementado a cada transição de nível (baixo para alto) do pulso de entrada externa. A máxima

razão do contador é de 1/24 da frequência do oscilador.

Os timers/counters podem ser inicializados e interrompidos por software possuindo quatro modos de operação que também são selecionados por software:

- Modo 0 : 8 bit timer/counter.
- Modo 1 : 16 bit timer/counter.
- Modo 2 : 8 bit timer/counter com 8 bit auto-reload.
- Modo 3 : Timer/counter 0 é configurado com 8 bit timer/counter e 8 bit timer e o Timer/counter 1 é configurado como counter.

O modo de operação do Timer0 na malha de controle do sistema é ilustrado pela Figura A.3.

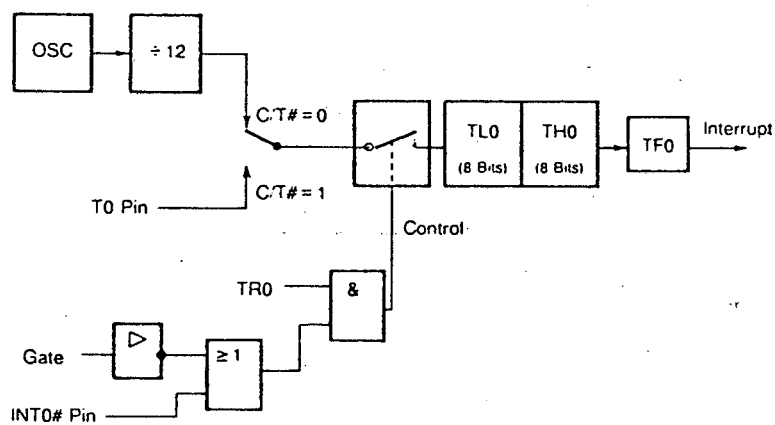


Fig. A.3 - Contador Programado no Modo 1.

O contador é inicializado por um valor pré-definido e habilitado na execução da rotina de programação do timer0 pelo bit TR0.

4 - Sistema de Interrupção

O microcontrolador 80535 possui 12 fontes de interrupção em 4 níveis de prioridade. Cada interrupção pode ser individualmente habilitada ou desabilitada e o tempo mínimo de resposta a uma requisição de interrupção é maior que três ciclos e menor que nove ciclos de máquina.

Cada fonte pode ser programada para ter quatro níveis de prioridade através das palavras de controle IP0 e IP1. Uma interrupção de baixo nível pode ser interrompida por uma interrupção de alto nível. As interrupções externas podem ser ativadas por nível ou por transição. A interrupção por nível se dá quando o sinal de interrupção assume o nível 0. A interrupção por transição se dá na passagem do nível alto para o baixo do sinal de interrupção. A Figura A.4 mostra o diagrama de blocos da estrutura de interrupção.

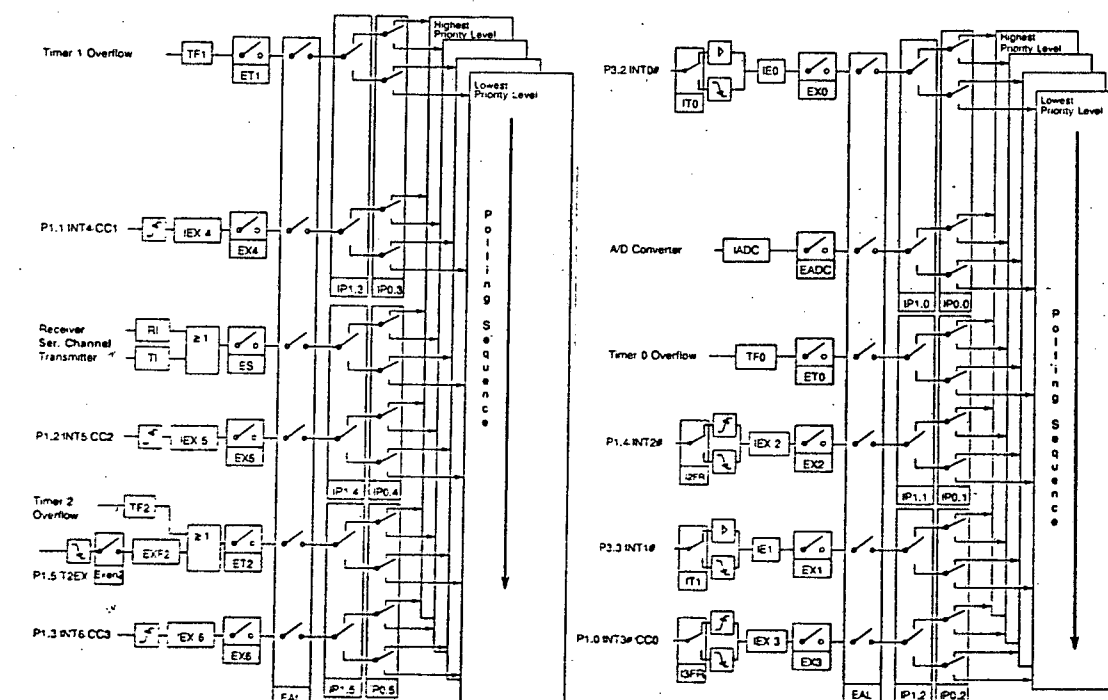


Fig. A.4 - Diagrama de Blocos das Interrupções.

O microcontrolador 80535 contém outras funções [16], que não foram mencionadas por não terem sido utilizadas diretamente no sistema.