

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

COM O USO DE SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS"

Délvio Franco Bernardes

Orientador : Prof. Dr. João Roberto Cogo

Co-orientador : Prof. Dr. Jocélio Souza de Sá

621.313.333; 681.3.07(043.2)

B518a

T. 660

CLASS. 621.313.333; 681.3.07(043.2)

CUTTER. B518a

TOMBO. 660

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA
ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

10.11.92
23.8.97
01.07.94
22.12.97
26.12.97
27.3.98
01.9.2000

Aos meus pais, à minha esposa
e ao meu filho

Agradeço a todos que contribuiram para a realização
deste trabalho, em destaque

ao engenheiro

José Manuel Esteves Vicente

ao desenhista

Argemiro dos Santos

ao jovem

Gilson de Rezende Camargo Júnior
pelos serviços de datilografia

e em especial ao professor

Dr. João Roberto Cogo

pelo estímulo contínuo e sempre solícita orientação.

Sinceramente,

Délvio Franco Bernardes

ÍNDICE

	P.G.
RESUMO	1
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	
1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	3
CAPÍTULO 2 - APLICAÇÃO DA TEORIA DA AMOSTRAGEM DE SINAIS	
1 - INTRODUÇÃO	6
2 - ANÁLISE DE UM SINAL ANALÓGICO ATRAVÉS DA AMOSTRAGEM DE SINAIS	6
3 - PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM MULTIPLEXADOR	15
4 - O USO DO MULTIPLEXADOR NA AQUISIÇÃO DE DADOS	16
5 - PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS	23
6 - DESCRIÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS COM ENTRADA SIMULTÂNEA - VERSÃO 1	33
7 - DESCRIÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS COM MULTIPLEXAGEM - VERSÃO 2	35

CAPÍTULO 3 - CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL	
1 - INTRODUÇÃO	38
2 - ADEQUAÇÃO DOS SINAIS À DIGITALIZAÇÃO	38
3 - A DIGITALIZAÇÃO	40
CAPÍTULO 4 - DETERMINAÇÃO DE GRANDEZAS REPRESENTATIVAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS	
1 - INTRODUÇÃO	43
2 - OBTENÇÃO DE GRANDEZAS NECESSÁRIAS PARA ANÁLISE DE ONDAS DISTORCIDAS	43
3 - DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR EM REGIME NOMINAL DE OPERAÇÃO	65
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS	
1 - INTRODUÇÃO	68
2 - MONTAGENS REALIZADAS	68
3 - REALIZAÇÃO DOS TESTES	72

4 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	72
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	74
BIBLIOGRAFIA	76
ANEXO 1	78

R E S U M O

Este trabalho tem por objetivo comparar os desempenhos de dois Sistemas de Aquisição de Dados. O primeiro, sem multiplexagem, trabalha com dez bits, pode operar com seis canais de entrada a uma taxa de amostragem de até 30 [kHz] ou com três canais de entrada em uma taxa de amostragem de até 60 [kHz]. O segundo, objeto deste desenvolvimento, com multiplexagem, trabalha com doze bits e possui seis canais de entrada e opera com uma taxa de amostragem de até 15 [kHz].

Deve-se salientar ainda, que o primeiro Sistema de Aquisição de Dados foi desenvolvido com recursos provenientes do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP). Tendo sido desenvolvido com a diretriz de apresentar um ótimo desempenho mesmo quando operando com sinais de frequência bastante elevada, muito além da natural de sistemas industriais, resultou em um projeto onde os componentes apresentavam um custo elevado.

Procurando minimizar este problema, foi desenvolvido o segundo Sistema de Aquisição de Dados, onde lançou-se mão do uso da multiplexagem resultando em um projeto onde os custos dos componentes utilizados foram sensivelmente reduzidos. Este desenvolvimento foi financiado pela empresa GSI Engenharia e Comércio Ltda.

O sistema de aquisição que trabalha sem multiplexagem deve ser empregado sempre que seja necessária uma alta precisão na medida realizada, mesmo que esta medição esteja sendo efetuada durante um regime transitório; como exemplo, cita-se a medição da corrente de partida de um motor de indução trifásico.

Tendo em vista que nos ensaios de motores de indução trifásicos em regime permanente, a frequência é sempre baixa (50 ou 60 Hz) e ainda, lembrando que nesta aplicação específica, o uso obrigatório de transdutores amplia ainda mais as constantes de tempo envolvidas no processo de medição, torna-se exequível nesta situação, a comparação dos desempenhos apresentados pelos dois Sistemas de Aquisição de Dados.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Administração Federal de Energia dos Estados Unidos da América, relatou em 1976, que 64% do total de energia elétrica consumida em sistemas industriais supria motores. No Brasil mais de 50% da energia destinada aos sistemas industriais é consumida por motores de indução trifásicos o que representa do total geral de energia consumida no país, algo em torno de 30%.

A verificação do desempenho de motores de indução no que se refere, principalmente, ao rendimento destas máquinas, é na atual conjuntura nacional de escassez de energia elétrica, uma das formas mais eficientes de promover-se a redução do desperdício. Este consumo desnecessário de energia no Brasil é em valores absolutos aproximadamente 2.250 [MWh], o que quer dizer que três geradores da usina hidroelétrica de Itaipu operam apenas para suprir tais perdas, as quais não possuem, obviamente, nenhuma utilidade.

No entanto, a realização de ensaios criteriosos que reflitam resultados confiáveis, esbarra em uma série de dificuldades. Dentre elas, ressaltam-se a necessidade do uso de equipamentos de medição que sejam compatíveis com a precisão necessária e o dinamismo que o sistema deve apresentar de modo a possibilitar a medição simultânea de diversas grandezas.

A utilização de um método de medição com equipamentos convencionais, tais como, voltímetros, amperímetros, wattímetros, fasímetros, tacômetros, etc., torna-se extremamente ineficaz, uma vez que este método é demasiado lento se comparado com a dinâmica

do processo. Vale salientar que este método resulta em uma série de erros de medida intrínsecos ao processo. De acordo com a causa ou origem dos erros cometidos durante a realização das medidas, estes podem ser classificados em: grosseiros, sistemáticos e acidentais [2].

Seja qual for o método de medição utilizado, torna-se quase sempre indispensável o emprego de transformadores de potencial, transformadores de corrente, divisores resistivos e outros equipamentos auxiliares. Desta forma os resultados obtidos são afetados também pelos erros inerentes destes equipamentos.

Buscando-se resolver os problemas relativos às medições desenvolveu-se um sistema de aquisição de dados que acoplado a um microcomputador efetua, de modo automático e preciso, medições eletromecânicas, as quais, neste trabalho, estão direcionadas para motores. Para atingir tal meta foi desenvolvida esta dissertação, onde buscou-se fazer um produto final acabado, passando pelos detalhes que lhe são pertinentes.

Assim subdividiu-se este trabalho em vários capítulos cujos objetivos estão descritos a seguir.

No capítulo 2 será mostrado a forma da discretização de um determinado sinal, avaliando qualitativamente o resultado da operação frente à Taxa de Amostragem utilizada. Em seguida, se discorrerá sobre a maneira como este sinal discretizado será armazenado, a fim de tornar possível sua posterior utilização.

Discute-se, também, neste capítulo o funcionamento de um circuito multiplexador e sua utilização em um sistema de aquisição de dados (SAD's).

Finalmente serão descritos os princípios de funcionamento de dois SADs, bem como os principais componentes utilizados

na elaboração das respectivas placas..

Já no capítulo 3 mostra-se a necessidade de adequação dos sinais analógicos existentes em sistemas elétricos e o modo como devem ser trabalhados de forma a possibilitar sua aquisição.

No capítulo 4 apresenta-se maneiras de serem determinados os valores das grandezas de interesse em sistemas elétricos. Para esta determinação serão usadas duas técnicas. A primeira, digital, utilizará a Transformada Rápida de Fourier e a segunda, analógica, usará transdutores, o que resulta em um menor tempo de processamento.

O capítulo 5 mostra as montagens realizadas em laboratório para a realização dos testes nos equipamentos. Encontrar-se-ão também os resultados obtidos dos testes realizados.

É objetivo do capítulo 6 mostrar as conclusões do trabalho, tendo em vista a comparação dos resultados obtidos. Serão também feitas sugestões para trabalhos futuros que tenham objetivos semelhantes aos deste.

CAPÍTULO 2 – APLICAÇÃO DA TEORIA DA AMOSTRAGEM DE SINAIS

1 – INTRODUÇÃO

A utilidade da Amostragem de Sinais está fortemente vinculada à necessidade de se determinar em um sistema elétrico real, por exemplo, os valores eficazes da tensão e da corrente, o valor da potência média (ativa), o fator de potência, etc., pois, na prática, as formas de onda de tensão e de corrente são distorcidas e não existem funções que, com soluções explícitas, consigam representá-las.

Neste capítulo, buscar-se-á a implementação de um processo de discretização de sinais de ondas de tensão e/ou corrente, aqui denominados por "sinal analógico", com o intuito de determinar os valores anteriormente relacionados.

2 – ANÁLISE DE UM SINAL ANALÓGICO ATRAVÉS DA AMOSTRAGEM DE SINAIS

O sinal mostrado na figura 1 a seguir, representa o aspecto normal que observa-se na prática, para as formas de onda de tensão e/ou corrente. A determinação dos valores característicos que definem o sinal em pauta, evidentemente, não pode ser conseguida por processos convencionais, porém a teoria de amostragem de sinais viabiliza a obtenção destes valores.

O processo de discretização do sinal está mostrado na figura 2. A figura 3, possibilita uma melhor visualização de detalhes do processo. O sinal mostrado na figura 1, resulta, após sua discretização, na forma de onda representada na figura 4.

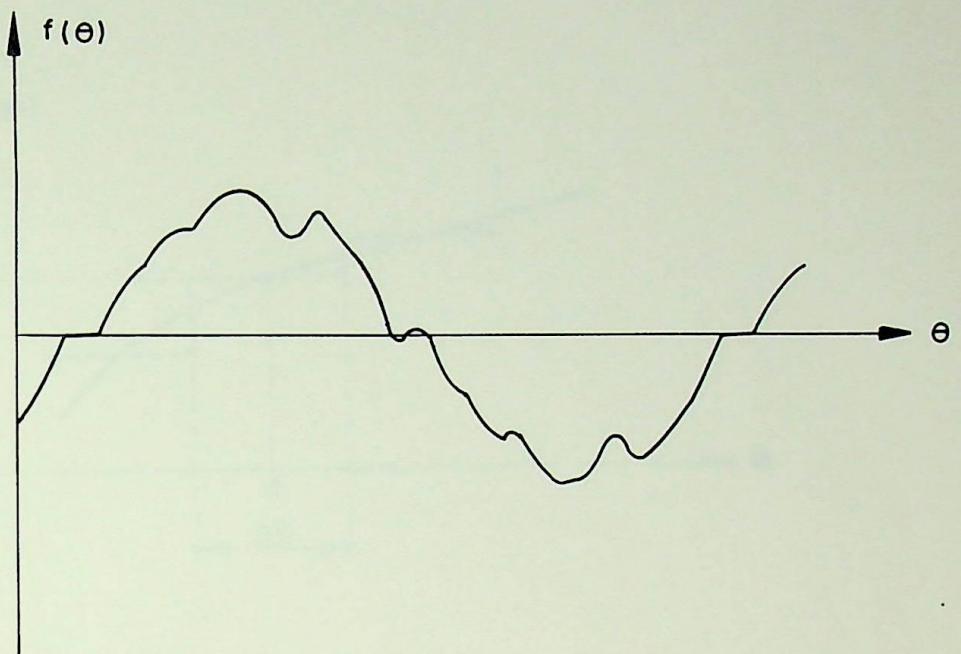


FIGURA 1 - Forma de onda do sinal analógico em análise

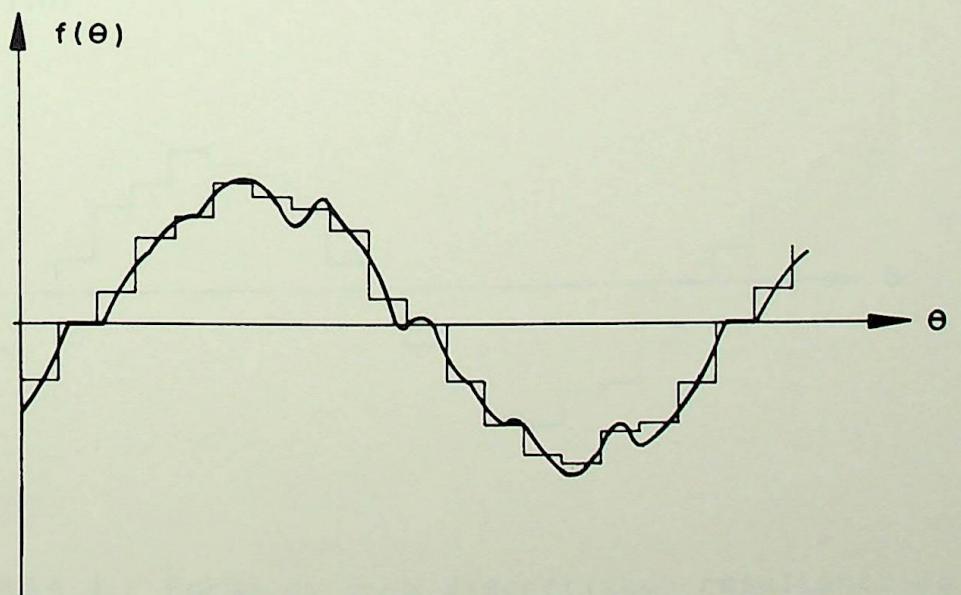


FIGURA 2 - Discretização do sinal analógico em análise

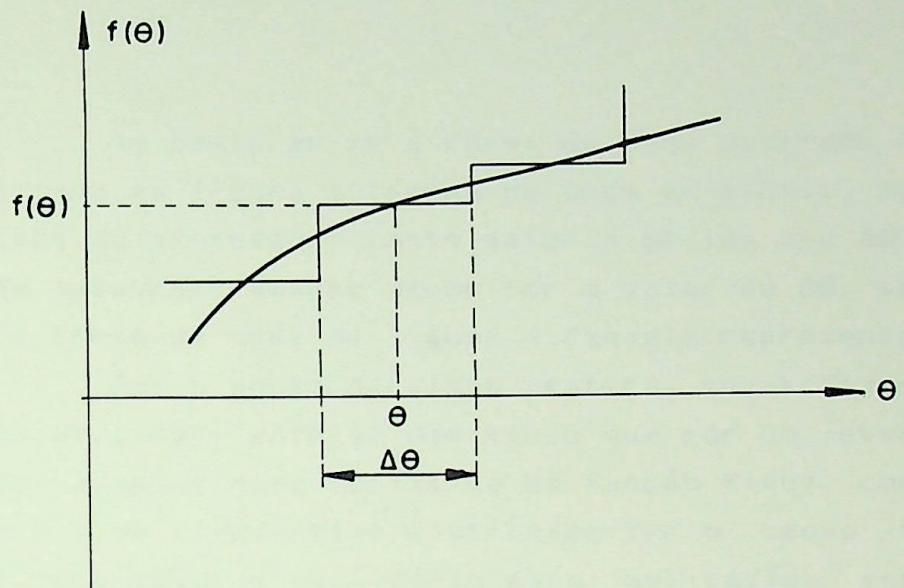


FIGURA 3 - Detalhe da discretização

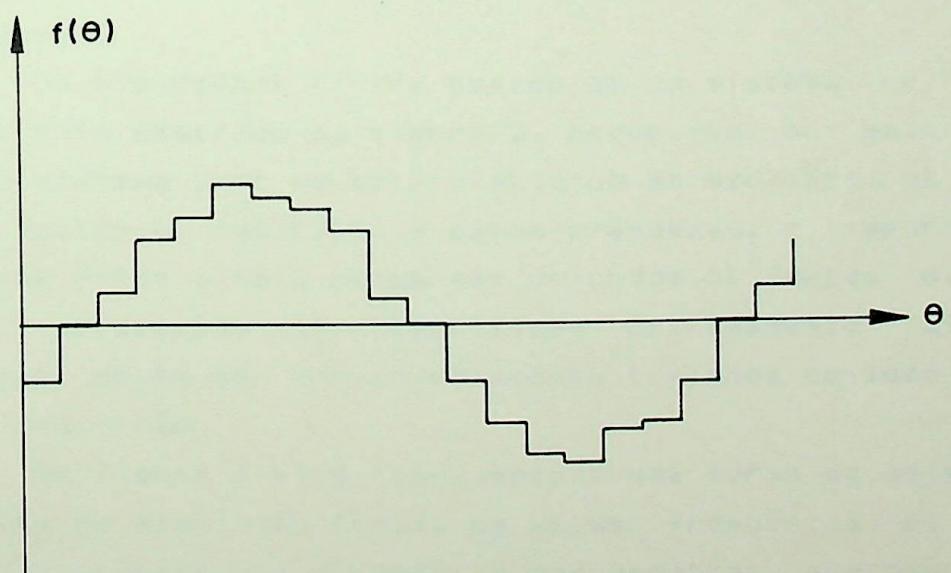


FIGURA 4 - Forma de onda discretizada resultante do sinal analógico apresentado na figura 1

Ao comparar-se a forma de onda mostrada na figura 4 com a indicada na figura 1 (forma de onda original), observa-se que a precisão do processo é tanto maior à medida que $\Delta\theta$ se reduz. Em outras palavras; quanto menor for o valor de $\Delta\theta$, mais próximo estará a forma de onda da figura 4 daquela representada na figura 1.

Sob o ponto de vista prático, ao se fazer a discretização de um sinal, está se admitindo que por um intervalo de tempo finito, o valor característico da função fique constante, o que permite a um dispositivo eletrônico ter o tempo necessário para reter este valor e utilizá-lo para aplicações específicas. Este processo denomina-se "Aquisição de Dados".

Aquisição de Dados se refere, portanto, à coleta de dados, simultânea ou não, de determinados sinais analógicos. Transdutores de entrada captam os sinais originários para serem condicionados e finalmente, medidos para se obter a sua correspondente forma digital.

Um fluxograma típico básico de um sistema de aquisição de dados, está mostrado na figura 5. Neste, um ou mais sensores captam do sistema onde se está efetuando as medições, os sinais de natureza analógica relativos a estas grandezas. É importante salientar que estes sinais podem ser oriundos de fontes diversas e portanto, apresentar características extremamente diferentes. Desta forma, devem ser convenientemente tratados de modo a se adequarem à aquisição.

Na figura 6 está representada uma forma de onda, onde as amostragens do sinal são feitas na mesma frequência da onda em análise. Observa-se que os valores das amostras, que são os pares ordenados $f(t)$ e $t(f(t),t)$, não fornecem qualquer informação sobre a verdadeira forma de onda do sinal, destacando apenas sua am-

plitude nos instantes t_1 , t_2 e t_3 .

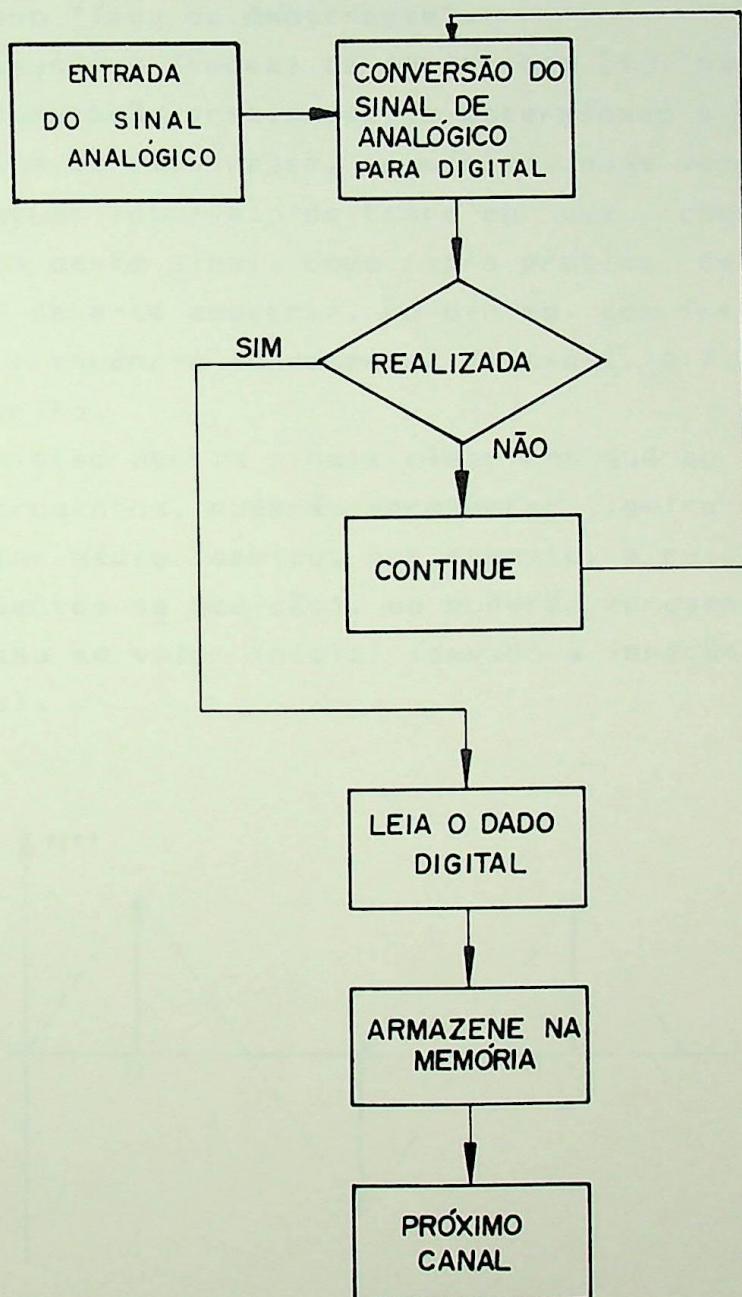


FIGURA 5 - Fluxograma típico de um sistema de aquisição de dados

A frequência com que o sinal analógico é amostrado é conhecida como "Taxa de Amostragem".

Segundo o Teorema da Amostragem [1], para que se consiga uma representação precisa de um determinado sinal, deve-se utilizar uma taxa de amostragem, no mínimo, duas vezes maior que o inverso do menor intervalo de tempo em que ocorre uma variação significativa deste sinal. Como regra prática, de modo a representar um sinal deve-se amostrar, no mínimo, com frequência dez vezes maior que a frequência fundamental do sinal. A figura 7 ilustra o que foi descrito.

Existem certos sinais elétricos que ao serem monitorados por instrumentos, poderão apresentar ligeira flutuação em relação ao valor médio (devido, por exemplo, a ruídos de baixa frequência presentes na medição), ou poderão apresentar ligeiro desvio em relação ao valor inicial (devido à impedância do instrumento utilizado).

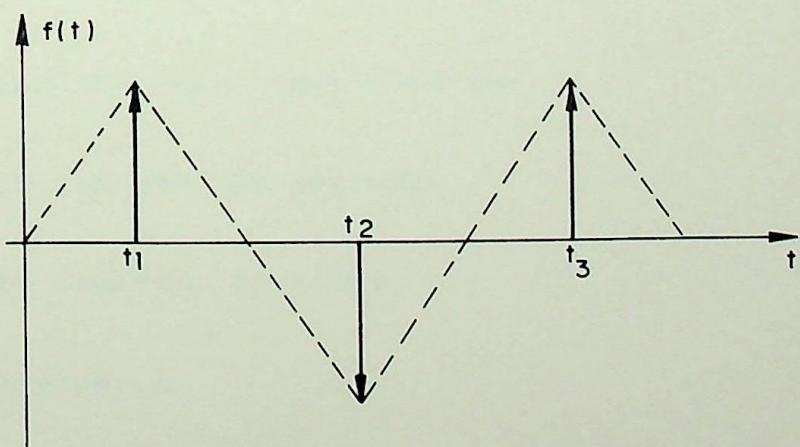


FIGURA 6 - Forma de onda com amostragens

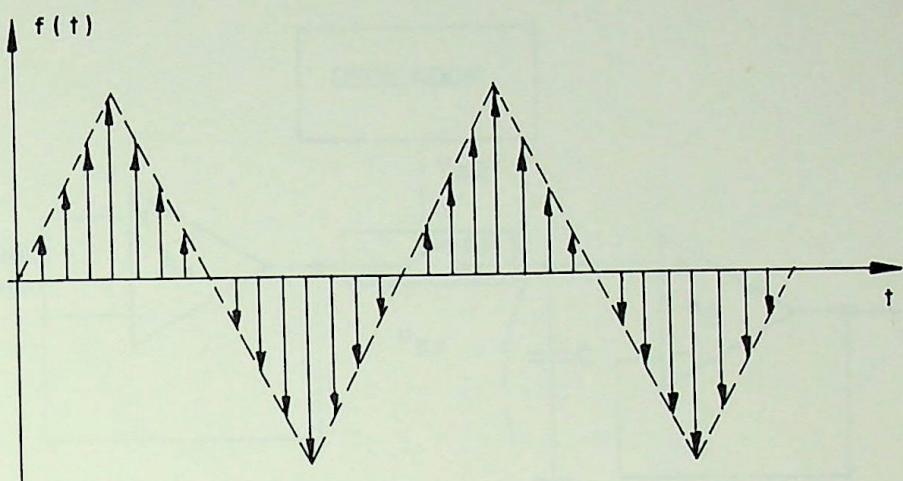


FIGURA 7 - Forma de onda com número adequado de amostragens

Para superar estes problemas, existem os "Circuitos Amostradores Retentores" (CAR) que, em um determinado instante, fazem a leitura do sinal e depois durante um intervalo de tempo maior, mantêm este valor armazenado para que o instrumento faça a medição.

Na figura 8 está mostrado um circuito amostrador retentor básico.

Nesta figura, identifica-se:

A_1 : Circuito isolador de entrada.

A_2 : Circuito isolador de saída.

C_H : Chave Analógica.

C : Capacitor de Armazenamento.

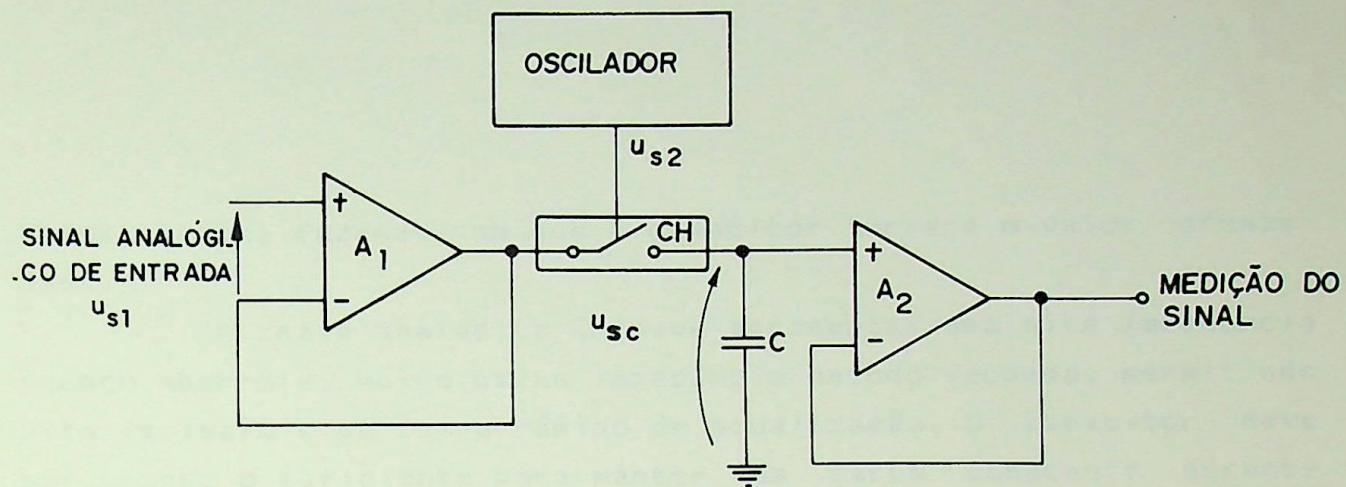


FIGURA 8 - Circuito amostrador retentor básico

OBS: O oscilador pode ser substituído por exemplo, por um sinal de controle proveniente de um microprocessador ou de um conversor analógico para digital (conversor A/D). A análise do conversor A/D será feita no capítulo 3.

O sinal que se deseja medir (sinal analógico de entrada mostrado na figura 8) é armazenado no capacitor C sempre que a chave CH fechar, o que em outras palavras significa que este capacitor será alimentado somente quando o oscilador enviar uma ordem para que a chave analógica CH se feche.

Portanto, o oscilador deverá, periodicamente, fornecer um pulso de comando, permitindo que a chave analógica se feche, e o capacitor se carregue com o novo valor do sinal aquisitado. Depois, a saída do oscilador permanece em zero, ou seja, mantendo a

chave aberta, fazendo com que o capacitor forneça o valor armazenado.

A chave analógica CH deve apresentar uma alta impedância quando aberta e, muito baixa impedância quando fechada, permitindo alta isolacão e um tempo rápido de atualização. O capacitor deve ser grande o suficiente para manter sua carga constante durante todo o tempo necessário.

Na figura 9 mostra-se um diagrama envolvendo os sinais de entrada/saída do conversor A/D visando a amostragem de um sinal analógico.

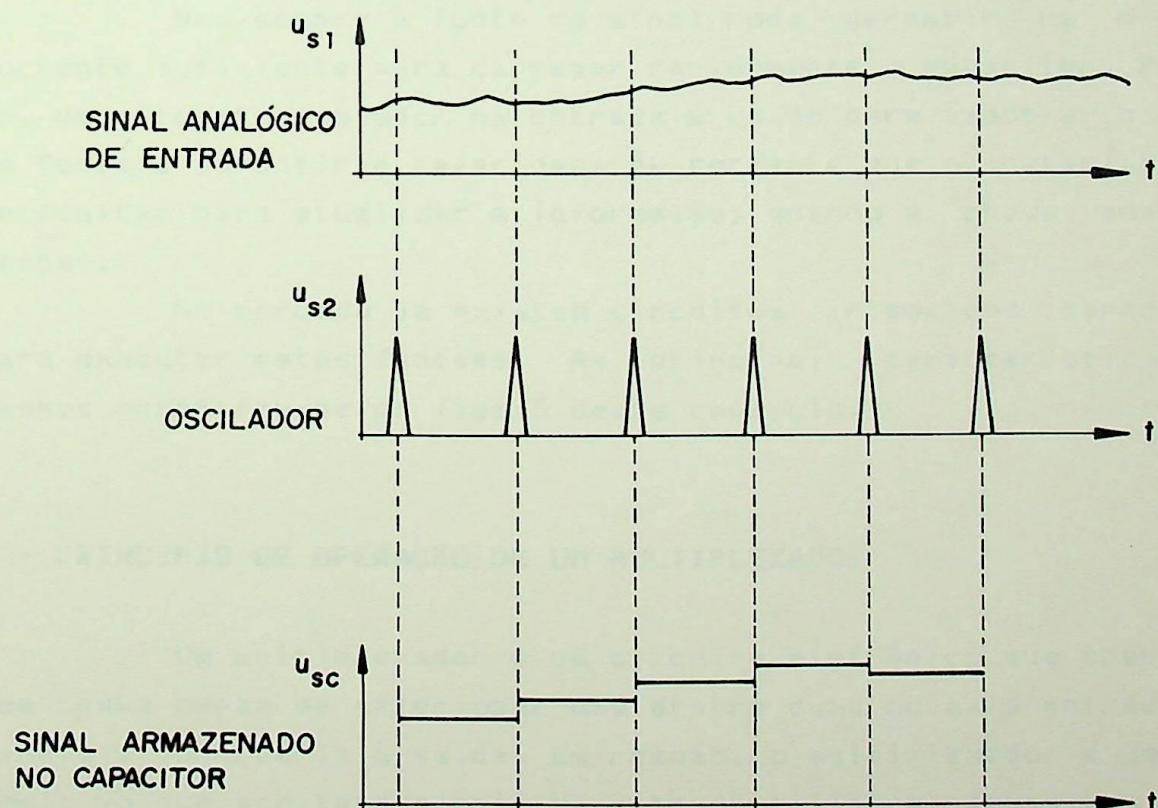


FIGURA 9 - Diagrama de tempo de amostragem

Sabendo-se que o capacitor está continuamente sujeito a um processo de descarga, deve-se estabelecer adequadamente um intervalo de tempo para nova leitura, em função do valor do capacitor, garantindo-se desta forma, uma descarga quase nula.

Um artifício, usado para minimizar a descarga do capacitor, é a inserção de um circuito isolador (constituído, por exemplo, por um amplificador operacional de alta impedância de entrada) em paralelo com o capacitor. Desta forma, o sinal armazenado no capacitor será amostrado na saída deste circuito isolador, que solicitando do capacitor uma corrente da ordem de nano-Ampere, faz com que a descarga seja praticamente nula.

Nem sempre a fonte do sinal pode garantir um pico de corrente suficiente para carregar rapidamente o capacitor. Portanto, um circuito isolador na entrada é usado para amostrar o sinal da fonte e garantir a capacidade de corrente que o capacitor vai necessitar para atualizar a informação, quando a chave analógica fechar.

No mercado já existem circuitos integrados específicos para executar estas funções. As principais características dos mesmos encontram-se no ítem 5 deste capítulo.

3 – PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM MULTIPLEXADOR

Um multiplexador é um circuito eletrônico que opera como uma chave capaz de selecionar uma dentre duas ou mais entradas de sinais e conectá-la à saída. Em resumo, o multiplexador é um dispositivo que aceita n sinais de entrada e libera apenas um deles, em função de um código de seleção pré-definido [3].

Na figura 10 apresenta-se um sistema multiplexador com base em uma chave seletora.

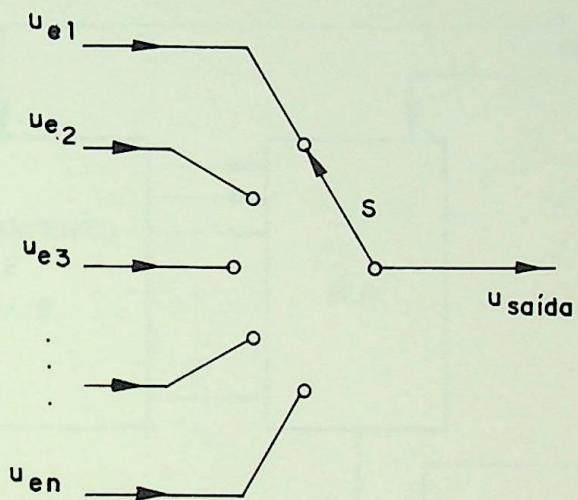


FIGURA 10 - Representação de um multiplexador através de uma chave seletora

Na figura 10, u_{e1} , u_{e2} , u_{e3} , ..., e u_{en} são sinais de entrada que serão selecionados pela chave "S". Na situação mostrada na ilustração, a tensão de saída ($u_{saída}$) está, devido à posição da chave seletora, assumindo o valor da tensão u_{e1} .

4 - O USO DO MULTIPLEXADOR NA AQUISIÇÃO DE DADOS

O caso mais simples da utilização do circuito multiplexador (MUX) é sua colocação antes do circuito amostrador retentor,

como mostra a figura ii, onde apenas um destes e um conversor A/D são utilizados para todos os sinais de entrada.

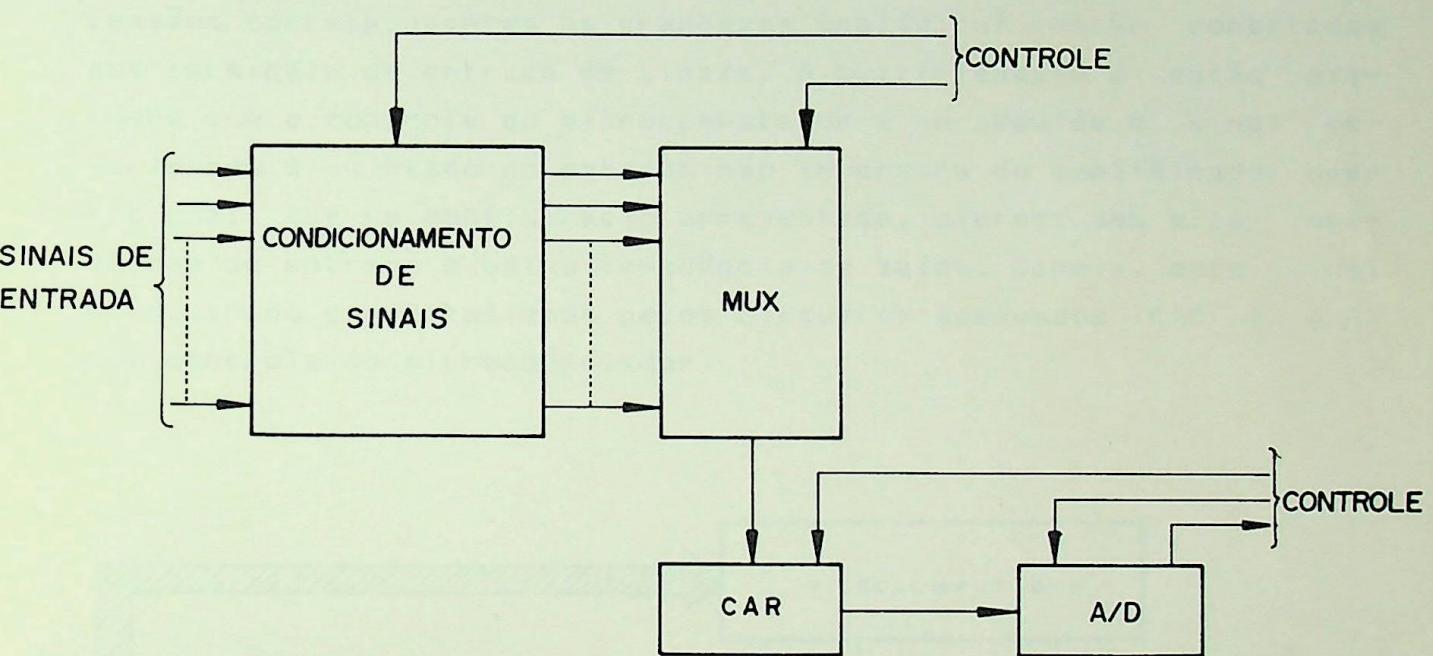


FIGURA ii - Aplicação do circuito multiplexador

Na figura ii, tem-se:

MUX - Circuito multiplexador.

CAR - Circuito amostrador retentor.

A/D - Circuito conversor A/D.

Uma forma mais detalhada de se mostrar esta aplicação do circuito multiplexador está indicada na figura 12. Nesta situação, tensões correspondentes às grandezas analógicas estão conectadas aos terminais de entrada de sinais. A multiplexagem é então efetuada com o controle do microcomputador e em seguida o sinal selecionado é injetado na entrada não inversora do amplificador operacional, que na configuração apresentada, oferece uma alta impedância de entrada e baixa impedância de saída. Depois, este sinal é amostrado e digitalizado pelos circuitos adequados (CAR e A/D) com controle do microcomputador.

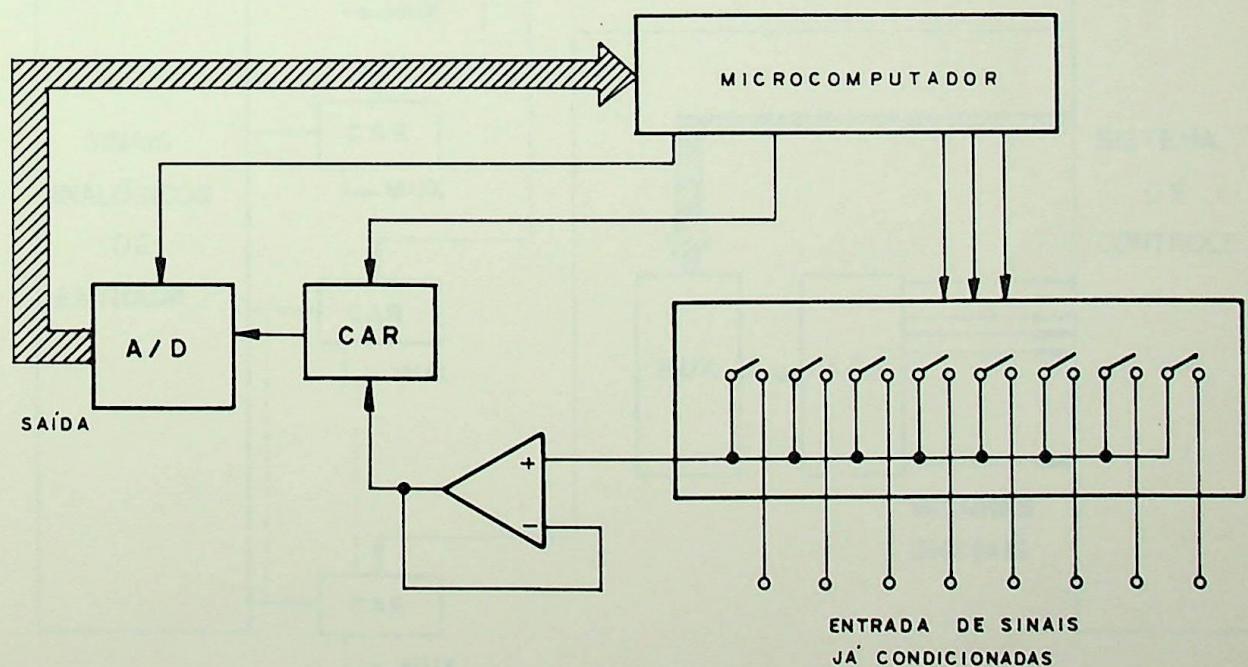


FIGURA 12 – Multiplexagem na entrada dos circuitos amostradores retentores

Onde é exigida uma maior velocidade de amostragem ou quando todos os dados devem ser amostrados simultaneamente, como é o caso do sistema de aquisição de dados com multiplexagem imediatamente anterior à conversão A/D, de agora em diante denominado "Versão 2", um circuito amostrador retentor deve ser utilizado para cada linha ou canal de entrada. Na figura 13 está mostrado um circuito típico utilizando vários destes circuitos para sistemas que necessitem de alta velocidade.

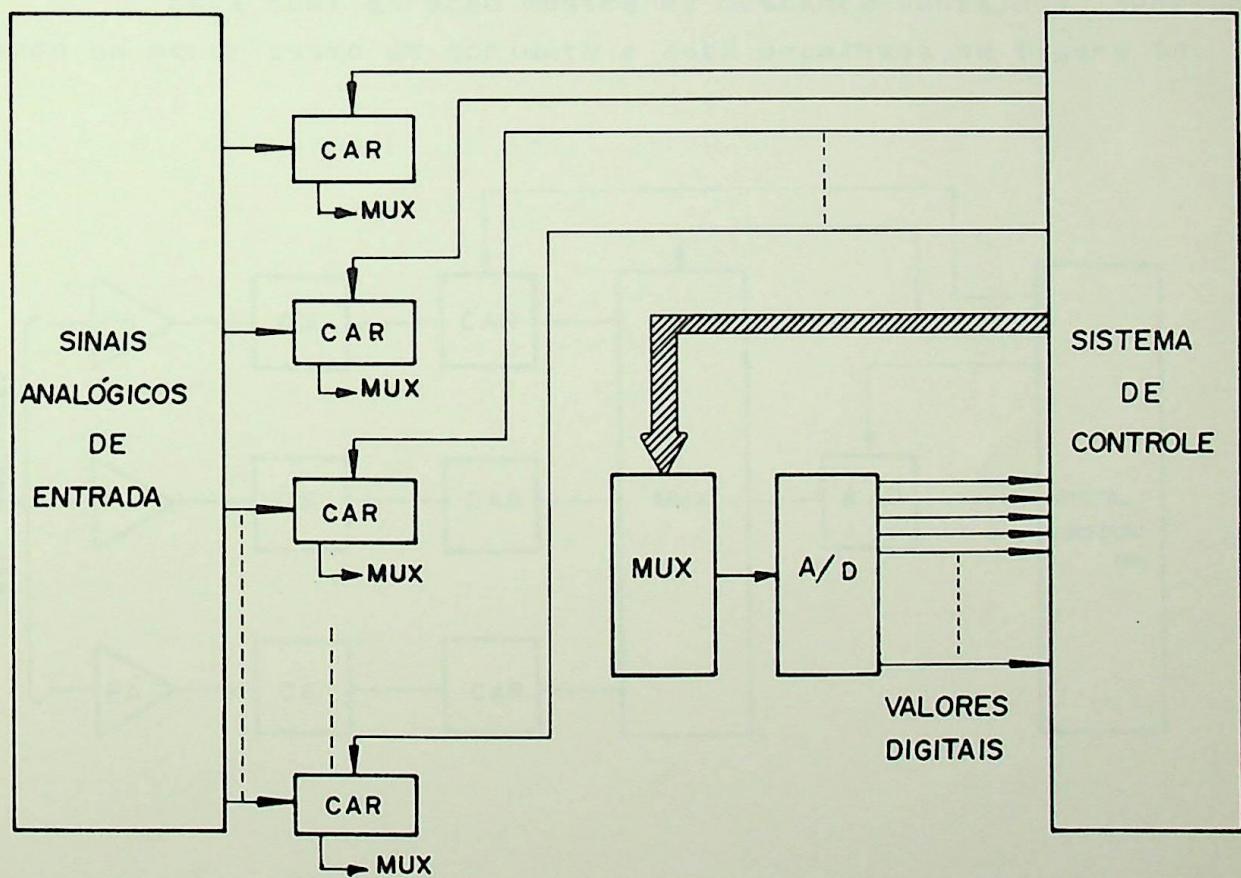


FIGURA 13 - Circuito multiplexador com várias entradas

Na figura 13, tem-se:

CAR - Circuito amostrador retentor.

MUX - Circuito multiplexador.

A/D - Circuito conversor A/D.

Esta configuração mostra-se bastante vantajosa apresentando um menor custo de conjunto e está detalhada na figura 14.

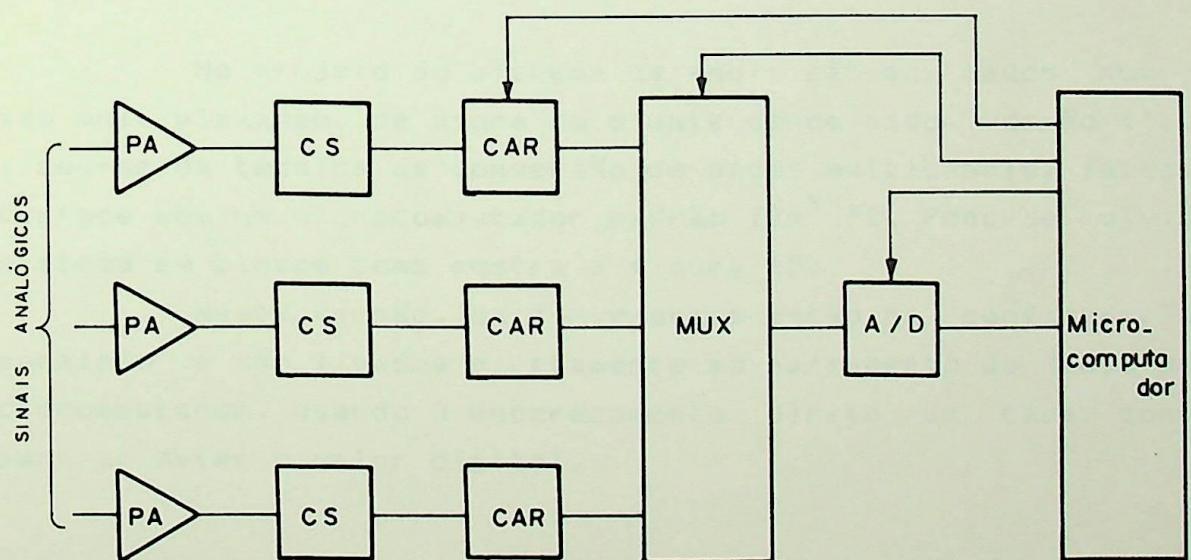


FIGURA 14 - Arranjo geral do sistema de multiplexagem

Na figura 14, tem-se:

PA - Circuito pré-amplificador.

CS - Circuito condicionador de sinais.

CAR - Circuito amostrador retentor.

A/D - Circuito conversor A/D.

MUX - Circuito multiplexador.

No projeto do sistema de aquisição de dados que opera sem multiplexagem, de agora em diante denominado "Versão 1", utilizou-se da técnica de conversão de dados multicanais, fazendo interface com um microcomputador padrão IBM* PC. Pode-se dividir o sistema em blocos como mostra a figura 15.

Nesta versão, os conversores estão na configuração "em paralelo" e são ligados diretamente ao barramento de dados do microcomputador, usando o endereçamento direto de cada conversor para se obter o valor digital.

IBM* - é marca registrada de International Business Machine

PC - Personal Computer (computadores de uso pessoal)

O sincronismo da amostragem na passagem por zero de um dos sinais de entrada, estabelecido previamente como referência, é conseguido com o uso de um circuito detetor de passagem por zero ("zero crossing").

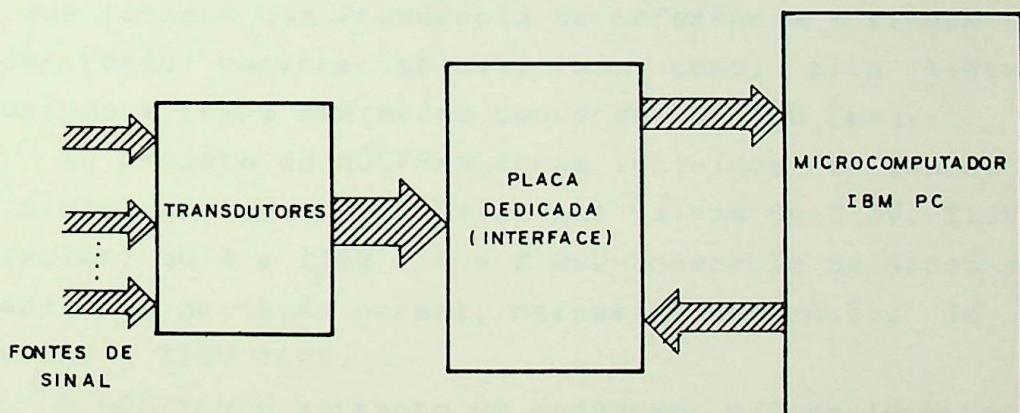


FIGURA 15 – Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados sem multiplexagem – Versão 1

5 - PRINCIPAIS COMPONENTES UTILIZADOS

5.1 - Componentes do sistema de aquisição de dados - Versão 1

5.1.1 - Conversor Analógico-Digital - AD579KN

O conversor AD579KN fabricado pela Analog Devices*, é um conversor de alta velocidade, de 10 bits (que se utiliza da técnica de aproximação sucessiva). É constituído inclusive, por um oscilador que fornece uma frequência de referência e também por um comparador. Possui características, tais como, alta linearidade, baixo consumo e tempo máximo de conversão de 1,8 [μ s].

No projeto do AD579KN foram incluídos resistores de modo a obter sinais analógicos de saída nas faixas de $\pm 5V$, $\pm 10V$ (operação bipolar) ou 0 a $\pm 10V$ e 0 a $\pm 20V$ (operação de dados em alta velocidade). Em operação normal, necessita de tensões de alimentação de $\pm 5V$ e $\pm 15V \pm 10\%$.

O AD579KN é portanto um conversor A/D de 10 bits completo não necessitando de componentes externos para executar a conversão.

Na figura 16 está mostrado o conversor AD579KN com a sua respectiva pinagem.

* - Marca Registrada

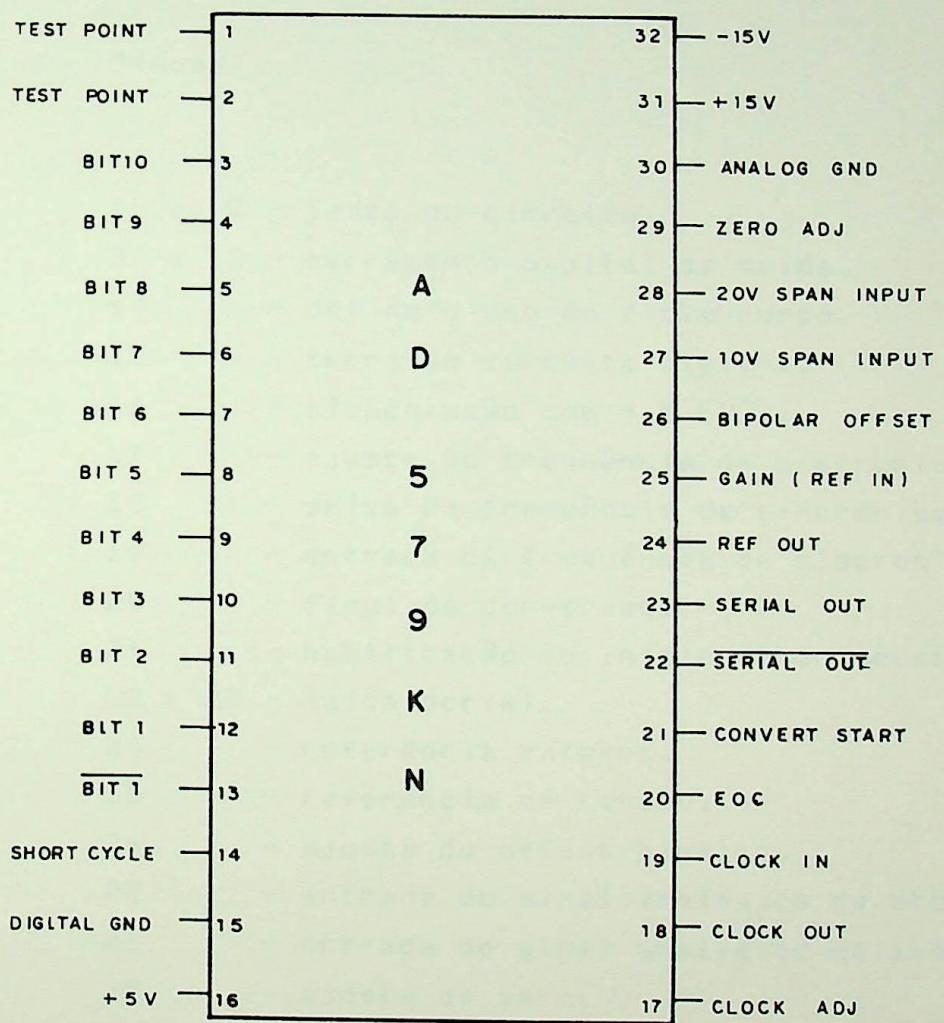


FIGURA 16 – Pinagem do circuito conversor AD579KN

Na figura 16, tem-se:

Pinos:

- 1 e 2 - teste do circuito.
- 3 a 13 - barramento digital de saída.
- 14 - define o uso do ciclo curto.
- 15 - terra do circuito digital.
- 16 - alimentação com + 5 [V].
- 17 - ajuste da frequência de sincronismo.
- 18 - saída da frequência de sincronismo.
- 19 - entrada da frequência de sincronismo.
- 20 - final da conversão.
- 21 - habilitação do início da conversão.
- 22 e 23 - saída serial.
- 24 - referência externa.
- 25 - referência de tensão.
- 26 - ajuste do offset bipolar.
- 27 - entrada do sinal analógico de até 10 [V].
- 28 - entrada do sinal analógico de até 20 [V].
- 29 - ajuste de zero.
- 30 - terra do circuito analógico.
- 31 e 32 - alimentação simétrica ± 15 [V].

5.1.2 - O Circuito de Amostragem

O AD585J fabricado pela Analog Devices é um circuito de amostragem monolítico, consistido de um amplificador operacional em série com uma chave analógica e um amplificador com alta impedância de entrada.

Com a chave analógica fechada, o AD585J funciona como um amplificador operacional comum; qualquer malha de realimentação pode ser conectada ao dispositivo para controlar o ganho e a resposta em frequência. Com a chave aberta o capacitor sustenta a saída no valor anterior.

Este circuito integrado apresenta uma alta velocidade de amostragem, o que o torna adequado para ser empregado em sistemas de aquisição de dados destinados a operar com sinais de alta frequência.

A figura 17 mostra o detalhes do AD585J com a respectiva pinagem.

5.1.3 - Decodificador 74LS138

O decodificador 74LS138 é um circuito integrado fabricado segundo a tecnologia TTL MSI Schottky*. Ele possui três linhas de entrada de seleção (A, B e C) e portanto permite selecionar até oito saídas (\bar{Y}_0 a \bar{Y}_7), possuindo ainda três entradas de controle (G_{2A} , G_{2B} e G_1) permitem habilitar o CI.

A figura 18 mostra a pinagem do 74LS138.

* - Marca Registrada

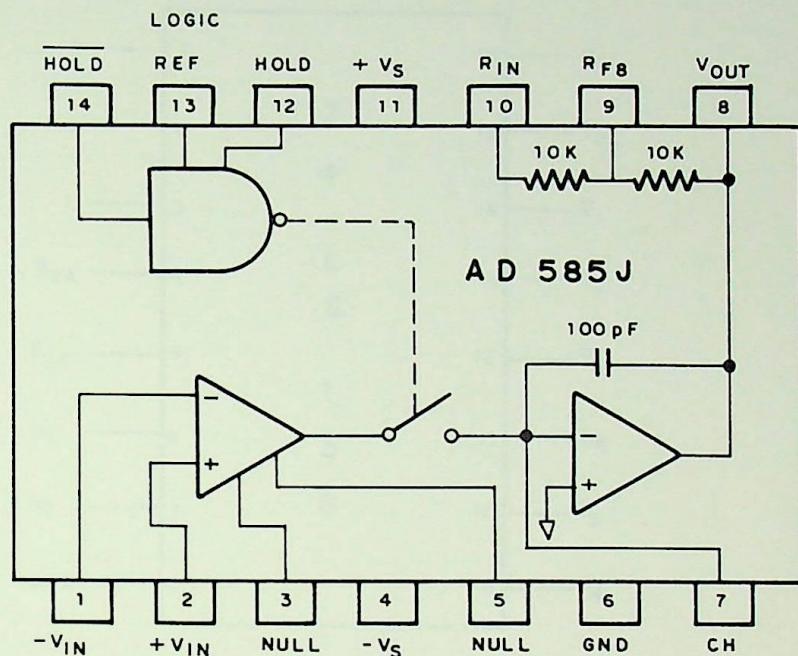


FIGURA 17 - Pinagem do circuito AD585J

Na figura 17, tem-se:

Pinos:

- 1 e 2 - entradas do sinal analógico.
- 3 e 5 - ajuste de offset.
- 4 - alimentação negativa.
- 6 - terra da fonte de alimentação.
- 7 - inserção opcional de capacitor.
- 8 - saída.
- 9 e 10 - divisor resistivo.
- 11 - alimentação positiva.
- 12, 13 e 14 - entrada dos comandos lógicos.

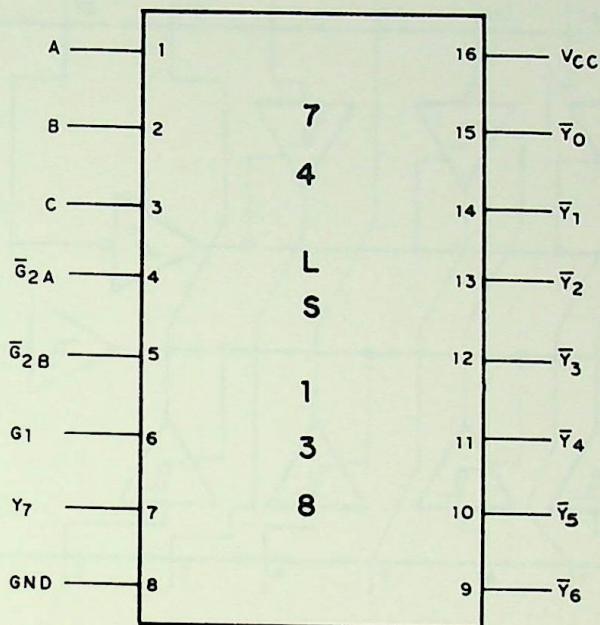


FIGURA 18 - Pinagem do circuito 74LS138

Na figura 18, tem-se o diagrama mostrando a pinagem do circuito 74LS138. Este componente faz parte do circuito de decodificação do sinal de saída do conversor A/D.

5.1.4 - O Circuito Isolador 74LS244

A figura 19 mostra a pinagem do 74LS244 onde estão representados oito circuitos isoladores não inversores com capacidade de serem conectados diretamente ao barramento.

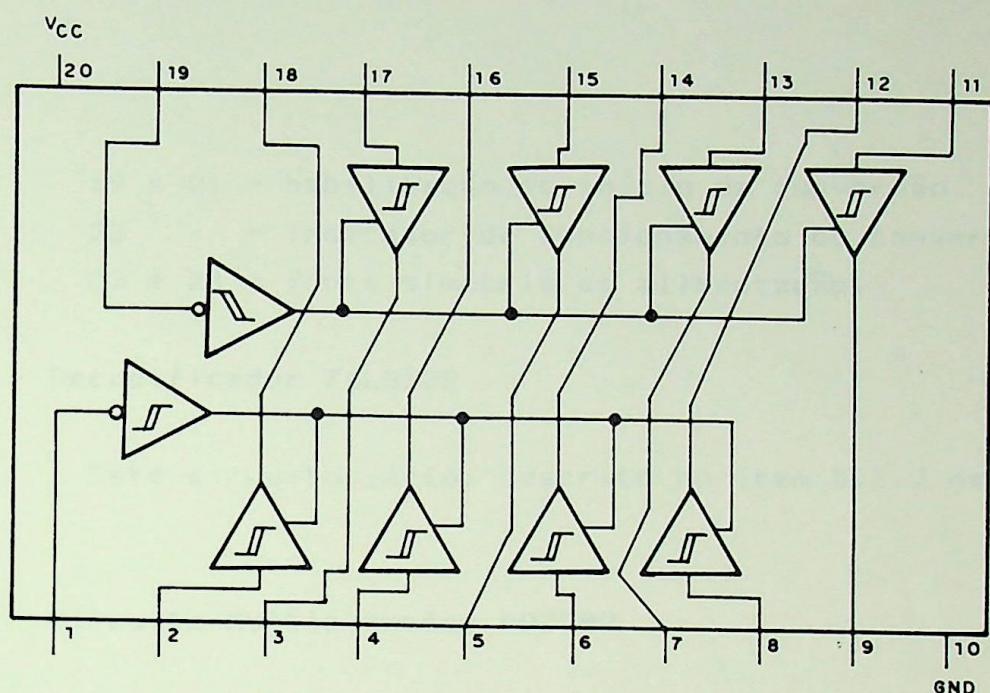


FIGURA 19 – Pinagem do circuito 74LS244

5.2 – Componentes do sistema de aquisição – Versão 2

5.2.1 – Conversor analógico-digital – AD7572JN12

O conversor AD7572JN12, fabricado pela Analog Devices, é um conversor de 12 bits que opera com um tempo máximo de conversão igual a $12,5 \mu\text{s}$.

Na figura 20 está mostrado o componente com sua respectiva pinagem.

- 19 a 21 - habilitação do início da conversão.
22 - indicador de funcionamento do conversor.
23 e 24 - fonte simétrica de alimentação.

5.2.2 - Decodificador 74LS138

Este circuito já foi descrito no ítem 5.1.3 deste capítulo.

5.2.3 - Circuito Multiplexador AD7502

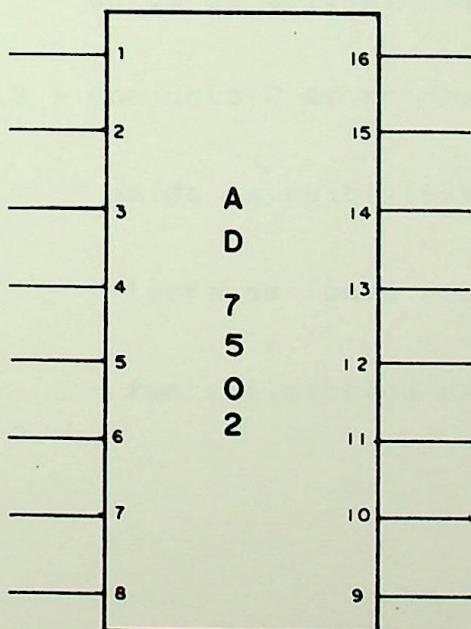


FIGURA 21 - Pinagem do circuito multiplexador AD7502

Na figura 2i, tem-se:

Pinos:

- 1 e 16 - controle da multiplexagem.
- 3 - habilitação da multiplexagem.
- 5 a 8 - conjunto i de entrada do multiplexador.
- 4 - saída da multiplexagem do conjunto i.
- 9 a 11 e 13 - conjunto 2 de entrada do multiplexador.
- 12 - saída da multiplexagem do conjunto 2.
- 2 - terra da fonte de alimentação.
- 14 e 15 - fonte simétrica de alimentação.

6 - DESCRIÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS COM ENTRADA SIMULTÂNEA - VERSÃO 1

A adequada combinação dos componentes brevemente descritos no ítem anterior, resulta no circuito eletrônico, de agora em diante denominado "Hardware", responsável pela aquisição de dados. Este hardware foi concebido de forma a possibilitar ao sistema de aquisição de dados, conter seis canais analógicos sendo três canais normalmente adaptados para receber sinais de tensão e três canais para sinais de corrente. Como já foi dito, nesta placa usou-se o modelo de conversores paralelos, conectados diretamente ao barramento de dados do microcomputador, usando o endereço direto de cada conversor para a obtenção do valor digital.

O diagrama básico de hardware da placa está apresentado na figura 22. Para poder-se construir este modelo, usou-se um conversor A/D com resolução de oito bits, com alta velocidade de conversão e com capacidade de ser conectado diretamente ao barramento. Seu emprego facilita de sobremaneira o processo de decodificação do sistema.

Os circuitos isoladores representados na figura 22 juntamente com os conversores A/D (blocos AD1 a AD6), necessitam dos sinais $\overline{OE_1}$, $\overline{OE_2}$, ..., e $\overline{OE_6}$, provenientes do circuito de decodificação, para que os sinais já amostrados e digitalizados (D0 a D7), sejam liberados ao microcomputador.

Internamente, o microcomputador processará estas informações e, de acordo com o programa, apresentará os resultados convenientes.

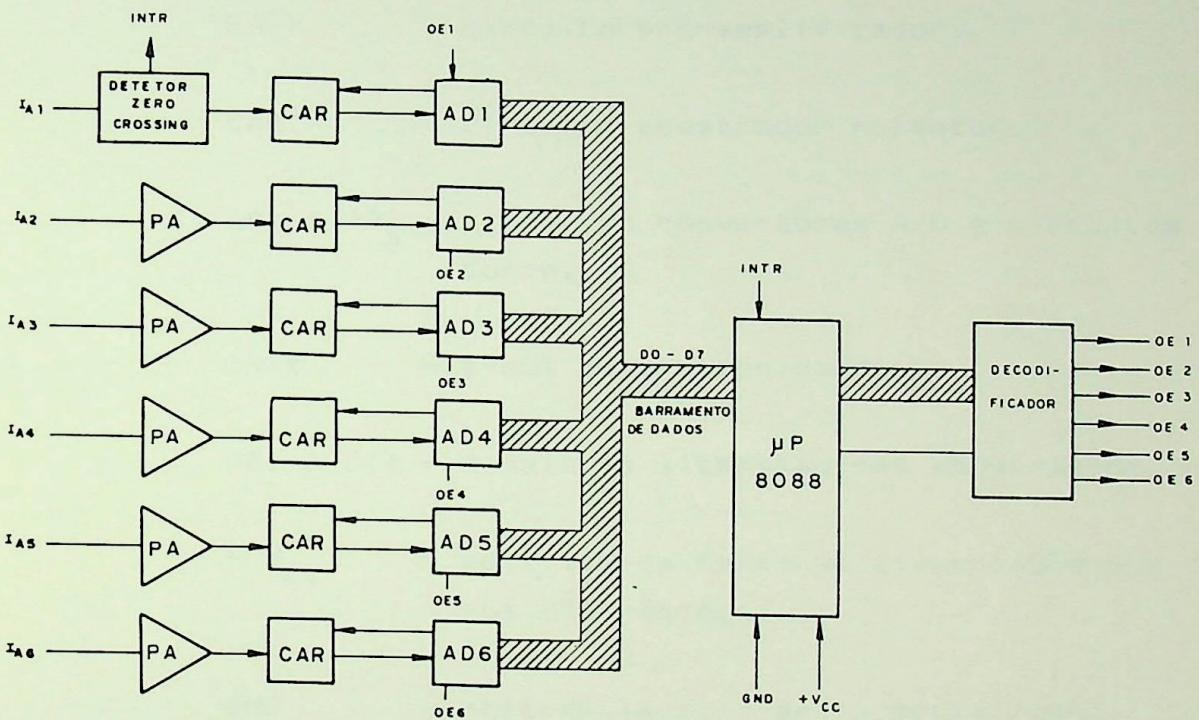


FIGURA 22 – Esquema do hardware da placa de aquisição de dados com entradas simultâneas

Na figura 22, tem-se:

PA - circuito pré-amplificador.

CAR - circuito amostrador retentor.

AD₁ a AD₆ - circuitos conversores A/D e circuitos isoladores.

INTR - sinal de sincronização.

OE1 A OE6 - sinais de liberação das amostragens.

+ V_{CC} - positivo da fonte de alimentação dos circuitos eletrônicos.

GND - referência zero desta mesma fonte.

I_{A1} a I_{A6} - sinais analógicos de entrada.

7 - DESCRIÇÃO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS COM MULTIPLEXAGEM - VERSÃO 2

O circuito eletrônico da placa de aquisição de dados com multiplexagem, ou seja, o hardware da Versão 2, foi projetado de forma a dispor de seis entradas que podem, a critério do usuário, serem ou não utilizadas na totalidade. Cada um destes canais de entrada possui um circuito amostrador retentor, o que possibilita

serem efetuadas, de forma simultânea, até seis operações de amostragem e retenção dos sinais aos quais pretende-se analisar. Depois de processada a amostragem, estes sinais são multiplexados pelos circuitos que compõem o bloco denominado "Multiplexador Analógico". Esta operação é realizada por dois elementos multiplexadores independentes que estão incluídos em um único circuito integrado. Em seguida, os sinais já multiplexados são digitalizados pelos dois circuitos conversores A/D que constituem o bloco denominado "Conversor". Os sinais provenientes do bloco Conversor, são agora colocados num barramento de dados do microcomputador.

Todo processo anteriormente descrito é comandado pelo bloco denominado "Unidade de Controle" que por sua vez é controlado e supervisionado pelo microcomputador.

A Unidade de Controle é constituída por circuitos combinacionais e sequenciais projetados a partir de portas lógicas.

Na figura 23, mostrada a seguir, está representado o diagrama em blocos do hardware utilizado na Versão 2.

Na figura 23, tem-se:

PA - circuito pré-amplificador.

CAR - circuito amostrador retentor.

MA - bloco multiplexador analógico.

CAD - bloco conversor A/D.

UC - unidade de controle.

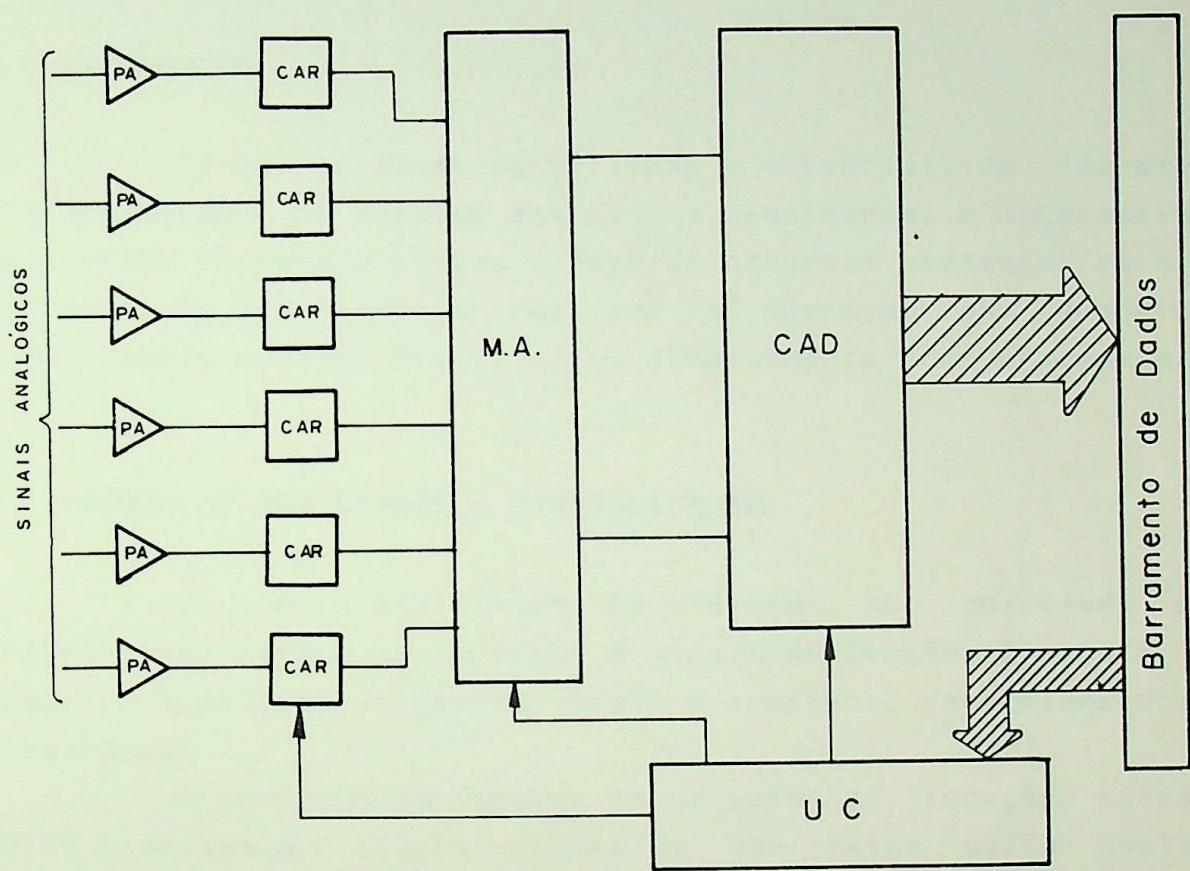


FIGURA 23 - Diagrama em blocos do hardware da Versão 2

CAPÍTULO 3 - CONVERSOR ANÁLOGO-DIGITAL

1 - INTRODUÇÃO

Tendo por objetivo utilizar o potencial de cálculo do microcomputador na análise dos sinais amostrados, é necessário que seja feita conversão destes sinais de natureza analógica em sinais digitais. Os circuitos que realizam tal operação são denominados "Conversores Análogo-Digitais" ou simplesmente "Conversores A/D".

2 - ADEQUAÇÃO DOS SINAIS À DIGITALIZAÇÃO

Os sinais analógicos pertinentes aos objetivos deste trabalho são sinais de corrente e sinais de tensão. A seguir será descrito como cada um destes sinais é tratado e posteriormente digitalizado.

A corrente do estator de um motor de indução trifásico (MIT) pode assumir valores dentro de uma faixa muito ampla de acordo com os dados nominais da máquina e das condições em que está operando. Porém, seja qual for a amplitude desta corrente, este sinal deverá ser transformado em um valor correspondente de tensão, de modo a poder ser avaliado. Uma forma que mostrou-se adequada para efetuar esta operação está indicada na figura 1.

A corrente solicitada da rede pelo estator do MIT (i_1) é reduzida a um valor conveniente (i_2) pelo transformador de corrente (TC). Outrossim, é conveniente o uso do transformador de corrente, devido à natural isolamento resultante deste procedimento, entre o sistema de potência e os circuitos eletrônicos. Pelo re-

sistor R_{SH} circula a corrente i_2 fazendo com que seja desenvolvida neste resistor a tensão u_{SH} , cuja forma de onda, pelas próprias características do circuito, correspondente à forma de onda de i_1 . A amplitude desta tensão é proporcional ao valor do resistor R_{SH} , que por sua vez é limitado pela capacidade de carga do transformador de corrente. Na prática, a tensão u_{SH} assume valores da ordem de alguns milivoltos até algumas centenas de milivoltos. Assim, é necessário amplificar este sinal de modo a compatibilizá-lo com os circuitos eletrônicos responsáveis pela digitalização. Esta última etapa é realizada por circuitos com amplificadores operacionais.

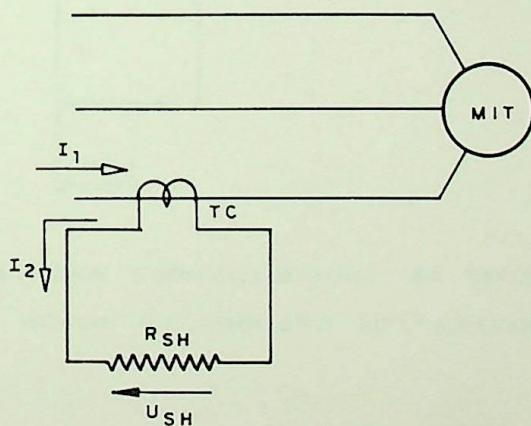


FIGURA 1 - Transformação do sinal da corrente em sinal de tensão

A tensão a que submete-se o estator do motor de indução trifásico (u_1) é, na prática, incompatível com os circuitos de digitalização. O transformador de potencial (TP) reduz este valor de modo satisfatório e promove a desejável isolacão entre o sistema

de potência e os circuitos eletrônicos. Finalmente, um divisor resistivo colocado no secundário do TP, ajusta a tensão (u_2) de saída deste último a um valor conveniente (u_{DR}). A figura 2 representa este circuito.

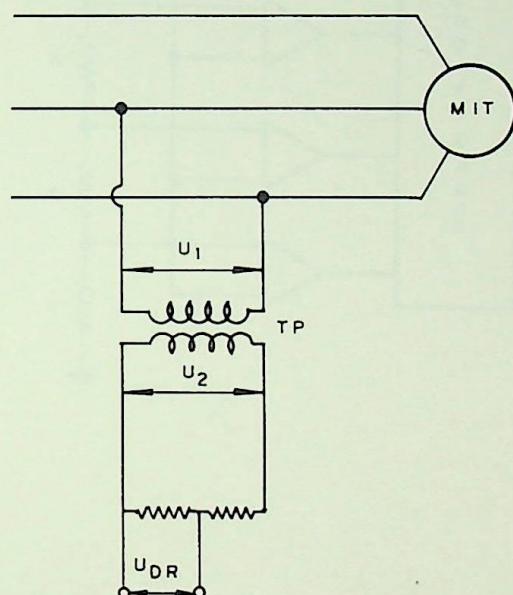


FIGURA 2 - Sistema condicionador da tensão aplicada ao motor de indução trifásico

3 - A DIGITALIZAÇÃO

Os sinais analógicos (u_{SH}) e (u_{DR}) deverão sofrer agora o processo de digitalização.

Na figura 3 estão representados os circuitos que compõem o conversor A/D.

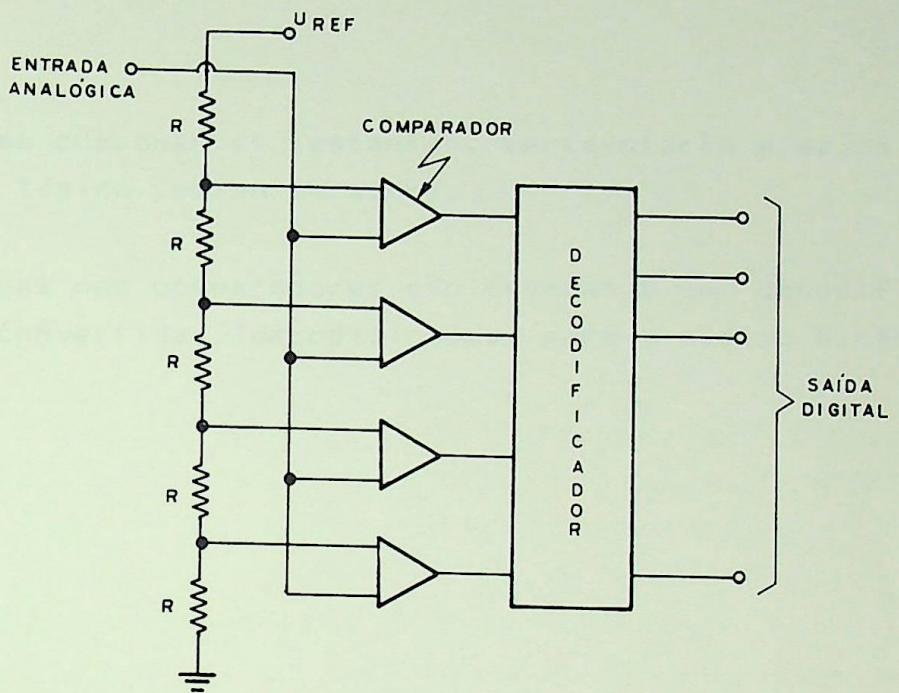


FIGURA 3 - Circuito conversor A/D

Como pode ser observado na figura 3, os comparadores estão conectados de forma tal que para um dado valor do sinal analógico de entrada, ocorre a seguinte situação:

- Todos os comparadores cuja tensão de referência esteja em um potencial abaixo daquele do sinal analógico apresentarão na saída um determinado estado lógico (alto ou baixo).

- Todos os componentes restantes, apresentarão a saída em um outro estado lógico (baixo ou alto).
- As saídas dos comparadores são levadas a um decodificador para serem convertidas (decodificadas) para o código binário.

CAPÍTULO 4 – DETERMINAÇÃO DE GRANDEZAS REPRESENTATIVAS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados duas técnicas para determinação das grandezas características de um sistema elétrico. A primeira, utiliza a Transformada Rápida de Fourier [8], totalmente digitalizada e opera com os valores instantâneos das grandezas. A outra técnica, trabalha com valores analógicos destas grandezas, valores estes que são operados através de transdutores e assim compatibilizados, em níveis correspondentes de tensão DC, para o sistema de aquisição. Em ambos os casos, pode-se considerar que a medição das grandezas envolvidas se processa de forma praticamente simultânea, muito embora os valores provenientes dos transdutores estejam sendo multiplexados.

O objetivo é estabelecer-se um patamar onde seja possível efetuar-se uma comparação entre as duas técnicas.

2 – OBTENÇÃO DE GRANDEZAS NECESSÁRIAS PARA ANÁLISE DE ONDAS DISTORCIDAS

Os sistemas elétricos, principalmente aqueles que propiciam o suprimento de energia a pontes conversoras, máquinas de solda, fornos a arco, reatores, compensadores estáticos, sistemas de transmissão em corrente contínua, etc., estão constantemente sujeitos a correntes e tensões que podem atingir um excessivo grau

de distorção. Neste sistemas podem estar instalados motores que estarão submetidos a estes sinais distorcidos, resultando quase sempre, em um modo de operação não conveniente, causando diversos problemas, nem sempre de fácil solução.

A análise destes sinais pode ser feita com osciloscópios, oscilógrafos, analisadores de harmônicos, etc..

Atualmente, é possível efetuar a aquisição dos dados desses sinais com o auxílio de um microcomputador. Os sinais análogicos de tensão e de corrente são convertidos em sinais digitais e armazenados na memória do microcomputador. Então, através da utilização de softwares apropriados pode-se:

- Analisar as formas de onda;
- Determinar o conteúdo dos harmônicos;
- Efetuar a medição automatizada nos mais diversos tipos de ensaios em motores, transformadores, geradores, etc;
- Analisar oscilações de tensão, "flicker", etc;
- Analisar a atuação de reguladores de velocidade e de tensão;
- Medir potências em sistemas que possuam cargas não lineares; e
- Utilizar o sistema como instrumento didático de laboratório.

Efetuar, em tempo real, as análises descritas por métodos convencionais seria inviável, visto que a taxa de variação desses sinais com o tempo é demasiadamente grande. Assim, o sistema deve memorizar, em tempo real, os sinais que se deseja analisar para posteriormente efetuar os cálculos necessários. Isto assemelha-se a "tirar uma foto" dos sinais e depois analisar a "fotografia".

Para atender ao exposto, os valores dos sinais terão

seus valores obtidos através da Série Trigonométrica de Fourier, onde para o sinal discretizado a Transformada Rápida de Fourier fornece os resultados indicados a seguir:

$$a_n = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=1}^N f(i) \cos \left[\frac{(i-1)}{N} n + 2\pi \right]$$

$$b_n = \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=1}^N f(i) \operatorname{sen} \left[\frac{(i-1)}{N} n + 2\pi \right]$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\phi_n = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right)$$

onde:

N - número de amostras contido em um período completo da função periódica $f(t)$.

i - número correspondente a uma determinada amostra.

$f(i)$ - valor apresentado pela função $f(t)$ na amostragem número i .

n - ordem do harmônico em análise.

C_n - módulo do harmônico de ordem n apresentado em um determinado ciclo de amostragem.

$$a_n = \operatorname{Re} [C_n]$$

$$b_n = I [C_n]$$

O sinal resgatado a partir dos parâmetros calculados pode ser expresso, no tempo, como sendo:

$$f(t) = \frac{C_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \cos \left(n\omega t - \phi_n \right)$$

Logo, adotando-se esta metodologia, pode-se determinar os harmônicos presentes em um sinal qualquer o que leva a poder se escrever que:

$$f(\theta) = \sum F_{\max_n} \operatorname{sen} \left(n\theta + \phi_n \right)$$

para $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

onde:

n - ordem do harmônico em análise.

θ - ângulo da qual a função $f(\theta)$ é dependente e é obtido

pela relação: $\theta = \frac{2\pi}{T} t$, t sendo T o período da função considerada.

F_{\max_n} - valor máximo do harmônico de ordem n .

Σ - somatório que quando sem indicação vai desde $n=0$ até $n = \infty$.

Na expressão anterior, $f(\theta)$ representa uma função qualquer que é dependente da variável θ . Deste modo, pode ser particularizada para representar a tensão $u(t)$ aplicada ao estator do motor de indução trifásico e a corrente $i(t)$ que circula por este circuito.

A determinação das grandezas representativas de um sistema elétrico, tais como, tensão eficaz, corrente eficaz, potência ativa e reativa, fator de potência, etc., estão mostrados no ítem a seguir.

3 - DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA ELÉTRICO CONSIDERANDO-SE O EFEITO DAS DISTORÇÕES NAS ONDAS DE TENSÃO E CORRENTE

3.1 - Técnica Digital

De um modo geral pode-se admitir que, na prática a forma de onda da tensão $u(t)$ e da corrente $i(t)$ em um motor de indução trifásico, não são senoidais. Deste modo, podem ser representadas

da seguinte forma:

$$u(t) = \sqrt{2} \sum u_n \operatorname{sen} (n\omega t + \theta_{un})$$

$$i(t) = \sqrt{2} \sum i_n \operatorname{sen} (n\omega t + \theta_{in})$$

onde:

u_n = valor eficaz (RMS) do harmônico de tensão de ordem n.

i_n = valor eficaz (RMS) do harmônico de corrente de ordem n.

θ_{un} = ângulo de fase do harmônico de tensão de ordem n no instante $t=0$.

θ_{in} = ângulo de fase do harmônico de corrente de ordem n no instante $t=0$.

Para calcular-se os valores relativos às potências ativa, reativa e aparente, bem como a outras grandezas de interesse, deve-se proceder a partir da análise das equações anteriores.

3.1.1 - Cálculo da Potência Ativa

A potência ativa (P) é dada por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

onde:

T = é o período das ondas de tensão e corrente cuja ordem do harmônico é i ($n = i$ correspondente ao fundamental)

Como a integral no período para as ondas de tensão e corrente de frequências diferentes é zero, ou seja, para $n \neq m$,

$$\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \sqrt{2} u_n \sin(n\omega t + \theta_{un}) \cdot \sqrt{2} i_m \sin(m\omega t + \theta_{im}) \right\} dt = 0$$

e pelo fato de que para as frequências iguais (mesma ordem dos harmônicos $n = m$), a integral do produto dos componentes harmônicos de tensão e corrente é constante, ou seja:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} \int_0^T & \left\{ \sqrt{2} u_n \sin(n\omega t + \theta_{un}) \cdot \sqrt{2} i_n \sin(m\omega t + \theta_{in}) \right\} dt = \\ & = u_n I_n \cos(\theta_{un} - \theta_{in}) \end{aligned}$$

logo, tem-se:

$$P = \sum U_n I_n \cos \theta_n$$

onde:

$$\theta_n = \theta_{un} - \theta_{in}$$

Desta forma pode-se escrever que:

$$P = P_i + P_H$$

onde:

$$P_i = U_i I_i \cos \theta_i$$

e

$$P_H = P - P_i = \sum_{n \neq i} U_n I_n \cos \theta_n$$

onde P_H é a parcela da potência ativa devida aos harmônicos de tensão e corrente de mesma ordem, sendo esta ordem, maior que i .

3.1.2 - Cálculo da Potência Aparente

A potência aparente é definida por:

$$S \triangleq U_{ef} \cdot I_{ef}$$

ou ainda:

$$S = \sqrt{\sum U_n^2} * \sqrt{\sum I_n^2}$$

3.1.3 - Fator de Potência

O fator de potência é a relação entre as potências média e aparente.

$$FP = \frac{P}{S}$$

3.1.4 - Cálculo da Potência Reativa

A potência reativa praticamente fica como uma decorrência da "diferença" entre P e S. Muitas vezes, de modo clássico, a potência reativa tem sido apresentada como sendo:

$$Q_B = \sum U_n I_n \operatorname{sen} \theta_n$$

e na frequência fundamental tem-se:

$$Q_i = U_i I_i \operatorname{sen} \theta_i$$

logo, o efeito dos harmônicos de tensão e corrente na potência reativa "seria" dado por:

$$Q_H = Q_B - Q_i$$

3.1.5 - Relação Entre P, Q e S

Muitos trabalhos publicados [4] e [5] têm procurado encontrar a melhor forma de relacionar as três grandezas. Em [4] o valor de Q deve ser calculado através de:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

que diverge do cálculo apresentado do item anterior.

Já conforme [5], o desenvolvimento normalmente se dá conforme a linha seguida originalmente por [6] e atualmente é adotada em normas de renome internacional [7].

$$u = \sum \sqrt{2} U_n \sin (n\omega t + \theta_{un})$$

$$i = \sum \sqrt{2} I_n \sin (n\omega t + \theta_{in})$$

fazendo-se

$$\theta_n = \theta_{un} - \theta_{in}$$

Neste caso, decompõe-se a corrente em duas parcelas, uma em fase com a tensão e outra em quadratura como ilustra a figura 1 a seguir.

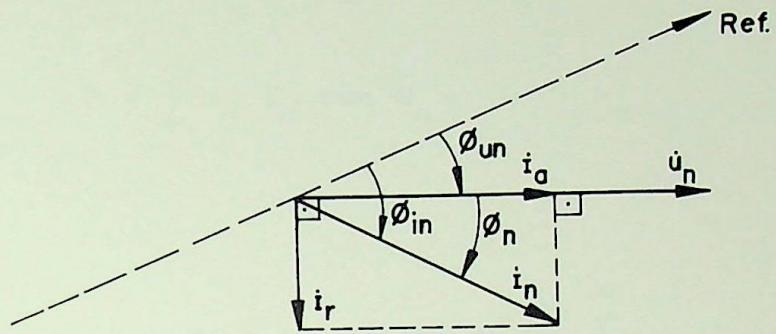


FIGURA 1 - Decomposição da corrente segundo o método BUDEANU

Para a figura 1 pode-se escrever fasorialmente:

$$I_n = I_a + j I_r$$

cujos valores instantâneos são:

$$i_a = \sum \left(\sqrt{2} I_n \cos \theta_n \sin (n\omega t) \right)$$

$$i_r = \sum \left(\sqrt{2} I_n \sin \theta_n \cos (n\omega t) \right)$$

obtendo-se então:

$$P = \sum U_n I_n \cos \theta_n$$

$$Q_B = \sum U_n I_n \sin \theta_n = U_1 I_1 \sin \theta_1 + \sum_{n=2}^{\infty} U_n I_n \sin \theta_n = Q_I + Q_H$$

$$D^2 = \sum_{m \neq n} \left[U_m^2 I_m^2 + U_n^2 I_n^2 - 2 U_m U_n I_m I_n \cos (\theta_m - \theta_n) \right]$$

Estas equações podem ser implementadas conforme mostra a figura 2 para aplicações gerais ou mesmo, como é o caso para motores de indução trifásicos.

Na figura 2, tem-se:

M1 a M6 - circuitos multiplicadores.

F1 - filtro para obtenção da frequência fundamental.

D1 - circuito derivador no tempo.

A1 - circuito amplificador.

R1 e R2 - circuito para obtenção de valores eficazes (RMS).

I1 a I4 - circuitos integradores no tempo.

S1 e S2 - circuitos subtrativos.

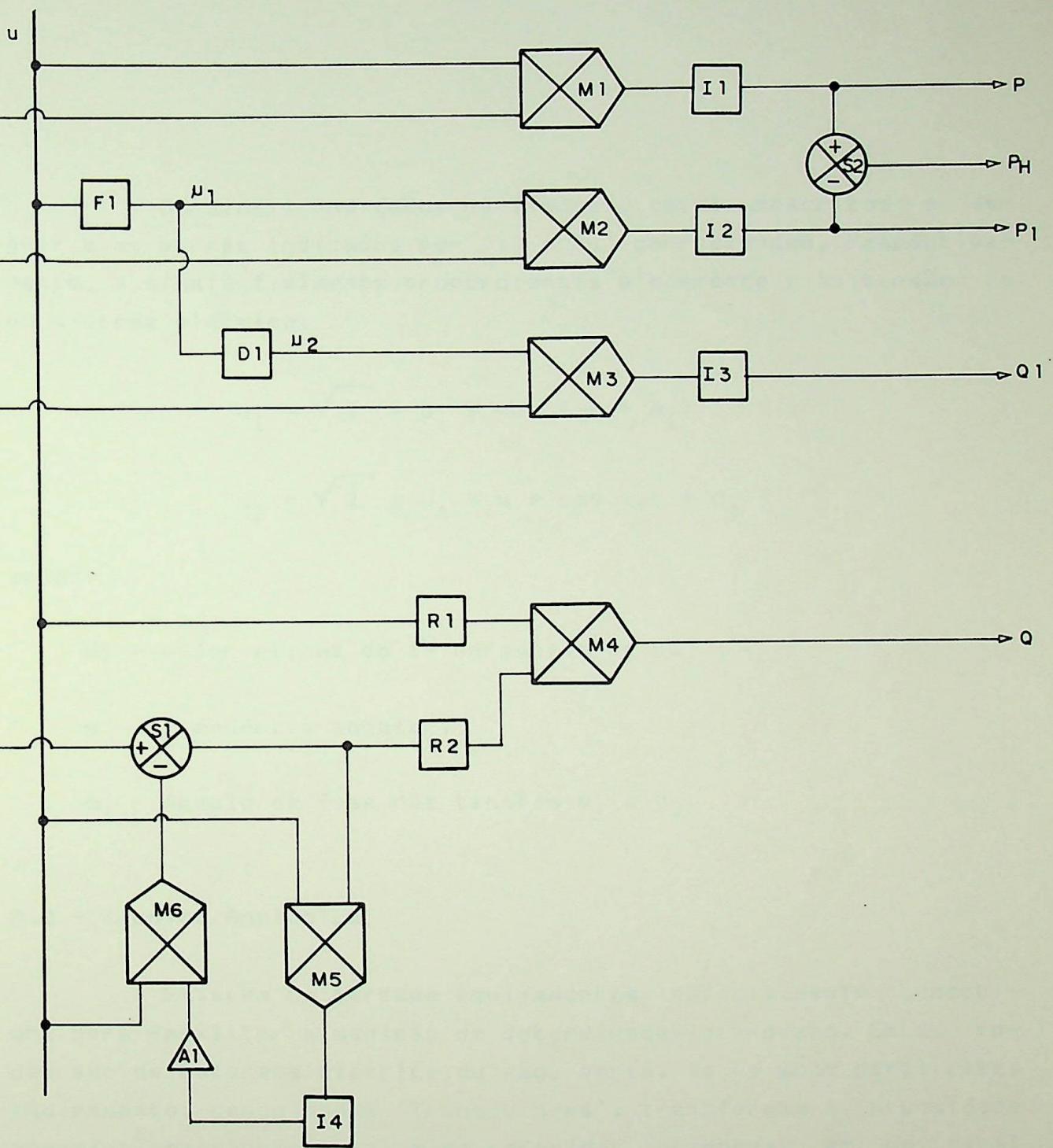


FIGURA 2 – Diagrama de circuitos para implementação
do equacionamento [5]

Os sinais indicados na figura 2 estão descritos a seguir e as barras indicadas por "i" e "u" correspondem, respectivamente, a sinais fielmente proporcionais à corrente e à tensão de um sistema elétrico.

$$u_1 = \sqrt{2} * U_i * \sin(\omega t + \alpha_i)$$

$$u_2 = \sqrt{2} * U_i * w * \cos(\omega t + \alpha_i)$$

sendo:

U_i - valor eficaz do i^{o} harmônico de u .

w - frequência angular.

α_i - ângulo de fase das tensões u_1 e u_2 .

3.2 - Técnica Analógica

Existem no mercado equipamentos especialmente concebidos para facilitar a medição de determinadas grandezas. Estas podem ser de natureza elétrica ou não, porém, de um modo geral estes equipamentos denominados "Transdutores", transformam a intensidade assumida momentaneamente pelas referidas grandezas em um sinal proporcional de tensão contínua. São facilmente encontrados transdutores de temperatura, de pressão, de potência elétrica, de velocidade, de tensão, de corrente, etc.

3.2.1 - Equipamentos Utilizados

Para o desenvolvimento deste ítem serão utilizados os transdutores cujas principais características estão descritas a seguir:

Transdutor de Corrente Alternada

Corrente de entrada : 0 até 5 [A]; 60 [Hz]
Tensão de saída : 0 até 5 [V]
Precisão : $\pm 0,25\%$ do fundo de escala
Ripple : 2% do fundo de escala
Resistência mínima de carga : 10 [Mohm]

Transdutor de Tensão Alternada

Tensão de entrada : 0 até 150 [V]; 60 [Hz]
Tensão de saída : 0 até 5 [V]
Precisão : $\pm 0,25\%$ do fundo de escala
Ripple : 2% do fundo de escala
Resistência mínima de carga : 10 [Mohm]

Transdutor de Potência Ativa

Tensão de entrada : 88 até 132 [V]; 60 [Hz]
Corrente de entrada : 0 até 5 [A]; 60 [Hz]
Tensão de saída : 0 até 5 [V]
Precisão : $\pm 0,25\%$ do fundo de escala
Ripple : 10% do fundo de escala
Outras características : trifásico, 3 fios

Transdutor de Velocidade

Tipo : Tacogerador de corrente contínua
Característica : 0,06 [V/rpm]

OBS: Para adequar a tensão gerada aos circuitos eletrônicos colocou-se na saída do tacogerador um divisor resistivo de forma que sua característica foi modificada para 0,001 [V/rpm]

Estes equipamentos deverão ser ligados conforme o diagrama de blocos mostrado na figura 3 a seguir.

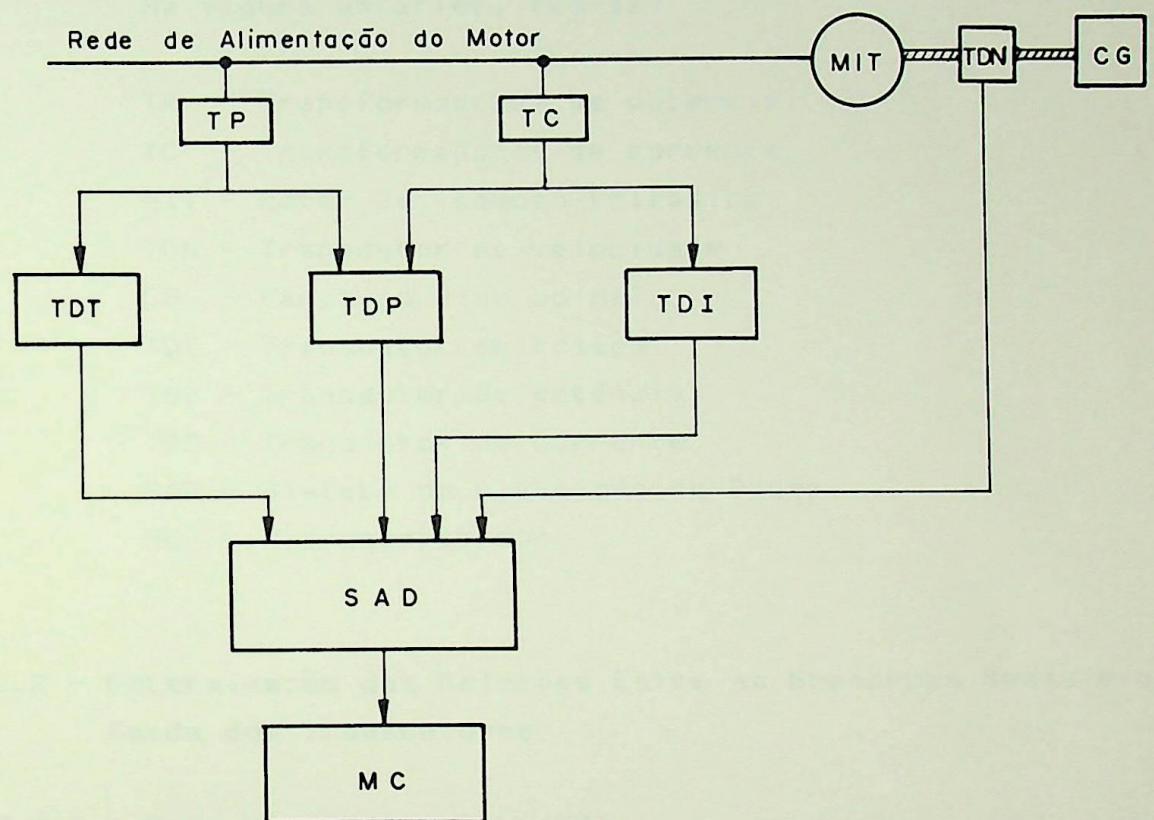


Figura 3 - Diagrama de blocos indicando a utilização dos transdutores

Na figura anterior, tem-se:

TP - Transformadores de potencial
TC - Transformadores de corrente
MIT - Motor de indução trifásico
TDN - Transdutor de velocidade
CG - Carga no eixo do MIT
TDT - Transdutor de tensão
TDP - Transdutor de potência
TDC - Transdutor de corrente
SAD - Sistema de Aquisição de Dados
MC - Microcomputador

3.2.2 - Determinação das Relações Entre as Grandezas Reais e as de Saída dos Transdutores

3.2.2.1 - Relação de corrente (KI)

Esta relação envolve as constantes do transformador de corrente e do transdutor de corrente.

Como pode ser observado nas características do transdutor de corrente, tem-se:

$$U_{STDC} = I_{ENT}$$

onde:

U_{STDC} = valor médio da tensão de saída do transdutor de corrente

I_{ENT} = valor eficaz (RMS) de corrente de entrada no transdutor de corrente

como:

$$I_1 = K_{TC} * I_{ENT}$$

onde:

K_{TC} = relação de transformação do transformador de corrente

I_1 = valor eficaz (RMS) de corrente no primário do transformador de corrente

tem-se:

$$K_I = K_{TC}$$

3.2.2.2. - Relação de tensão (KT)

Esta relação envolve as relações do transformador de potencial e do transdutor de tensão.

Como pode ser observado nas características do transdutor de tensão, tem-se:

$$U_{STDT} = \frac{U_{ENT}}{30}$$

onde:

U_{STDT} = valor médio da tensão de saída do transdutor de tensão

U_{ENT} = valor eficaz (RMS) da tensão aplicada ao transdutor de tensão

como:

$$U_1 = K_{TP} * U_{ENT}$$

onde:

U_1 = valor eficaz (RMS) da tensão no primário do transformador de potencial

K_{TP} = relação de transformação do transformador de potencial

tem-se:

$$K_T = 30 * K_{TP}$$

3.2.2.3 - Relação de potência ativa (KP)

Esta relação envolve as relações dos transformadores de potencial e de corrente e do transdutor de potência ativa.

Como pode ser observado nas características do transdutor de potência ativa, tem-se:

$$U_{STD P} = \frac{P_{ENT}}{200}$$

onde:

U_{STDP} - valor médio da tensão de saída do transdutor de potência ativa

P_{ENT} - potência na entrada do transdutor de potência ativa

como:

$$P_1 = K_{TP} * K_{TC} * P_{ENT}$$

onde:

P_1 - potência ativa nos primários dos transformadores de potencial e de corrente

tem-se, então:

$$K_P = 200 * K_{TP} * K_{TC}$$

3.2.2.4 - Relação de velocidade (KN)

Esta relação envolve apenas a relação do transdutor de velocidade.

Como pode ser observado nas características deste transdutor, tem-se:

$$U_{STDN} = \frac{n}{1.000}$$

onde:

U_{STDN} = valor médio da tensão de saída do transdutor de velocidade.

n = velocidade do motor de indução trifásico.

Assim, tem-se:

$$K_N = 1.000$$

Para se calcular as grandezas de interesse deve-se proceder a partir das equações mostradas a seguir:

3.2.3 - Cálculo da Potência Aparente

A potência aparente (S) é dada por:

$$S = \sqrt{3} * U_{STDc} * U_{STDt} * K_I * K_T$$

3.2.4 - Cálculo do Fator de Potência

O fator de potência (FP) é dado por:

$$FP = \frac{200 * U_{STDp}}{\sqrt{3} * 30 * U_{STDc} * U_{STDt}}$$

3.2.5 - Cálculo da Potência Reativa

A potência reativa (Q) é dada por:

$$Q = S * \sqrt{i^2 - (FP)^2}$$

4 - DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DO MOTOR EM REGIME NORMAL DE OPERAÇÃO

Quando o motor de indução trifásico está funcionando dentro de sua faixa de velocidade normal de operação, pode-se estimar, conforme [9], que a potência mecânica desenvolvida no eixo da máquina é dada pela seguinte equação:

$$P_{MEC} = \left(P_1 - P_0 + 3 * R_1 * I_0^2 - 3 * R_1 * I_1^2 \right) * n / n_1$$

sendo:

P_{MEC} - potência mecânica desenvolvida pelo motor.

P_1 - potência elétrica absorvida pelo motor.

P_0 - potência absorvida pelo motor funcionando em vazio.

R_1 - resistência de fase do estator do motor.

I_0 - corrente de fase do estator do motor funcionando em vazio.

I_1 - corrente de fase do estator do motor.

n - velocidade do rotor.

n_1 - velocidade do campo girante.

O MIT utilizado nos testes de laboratório apresentou os seguintes resultados quando operando com o rotor livre:

$$P_0 = 770,00 \text{ [W]}$$

$$I_0 = 9,69 \text{ [A]}$$

A resistência medida de uma fase do estator foi:

$$R_1 = 1,14 \text{ [\(\Omega\)]}$$

Desta forma, pode-se particularizar a equação da potência mecânica, resultando na seguinte expressão:

$$P_{MEC} = \left(P_1 - 663 - 1.14 * I_1^2 \right) * n / 1200$$

Desta forma, pode-se calcular o rendimento usando-se sua definição dada pela expressão a seguir:

$$\eta \triangleq \frac{P_{MEC}}{S * FP} * 100$$

onde:

η - rendimento porcentual.

P_{MEC} - potência mecânica desenvolvida.

S - potência aparente.

FP - fator de potência.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS OBTIDOS

1 - INTRODUÇÃO

Com base no equacionamento mostrado no capítulo anterior, foram desenvolvidos programas de computador que permitiram a apresentação dos resultados indicados nas tabelas a seguir.

Estes resultados refletem o comportamento do motor de indução cujos dados de catálogo estão no anexo i, quando submetido a testes com carga. Deve ser lembrado que este trabalho não tem por finalidade analisar estes resultados objetivando o conhecimento das características do motor, mas sim, avaliar o desempenho do sistema de aquisição de dados - Versão 2, tomando-se por base os resultados obtidos da Versão 1. Salienta-se que estes últimos já foram exaustivamente analisados e questionados e, no entanto, mostraram-se de todo confiáveis.

2 - MONTAGENS REALIZADAS

2.1 - Montagem Para o Teste Supervisionado Pela Versão 1

A figura i, mostrada a seguir, indica o diagrama da montagem feita para a obtenção dos resultados colocados na Tabela i deste capítulo.

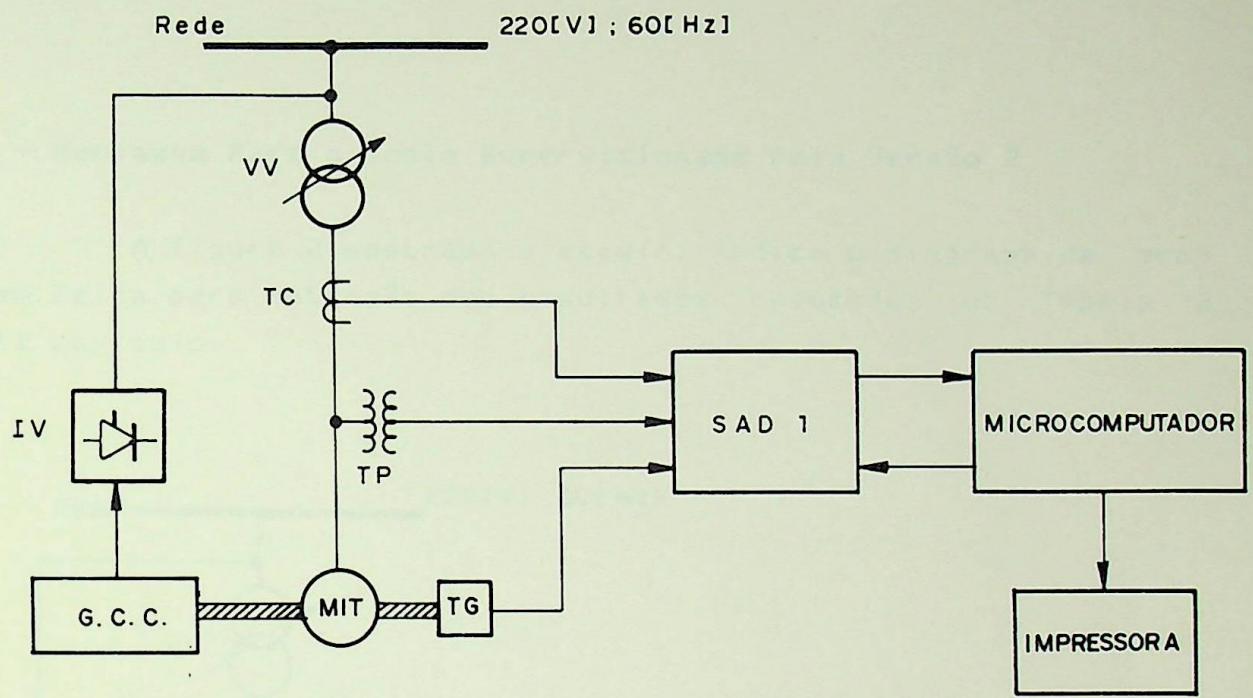


FIGURA 1 - Diagrama da montagem para obtenção dos valores mostrados na Tabela i

Na figura 1, tem-se:

- VV - variador contínuo de tensão.
- TC - Transformador de corrente.
- TP - Transformador de potencial.
- MIT - Motor de indução trifásico em teste.
- GCC - Gerador de corrente contínua de excitação independente.
- IV - Inversor trifásico comutado pela rede de suprimento de energia
- TG - Tacogerador.
- SAD1 - Sistema de aquisição de dados - Versão 1.

2.2 – Montagem Para o Teste Supervisionada Pela Versão 2

A figura 2 mostrada a seguir, indica o diagrama da montagem feita para obtenção dos resultados colocados na Tabela 2 deste capítulo.

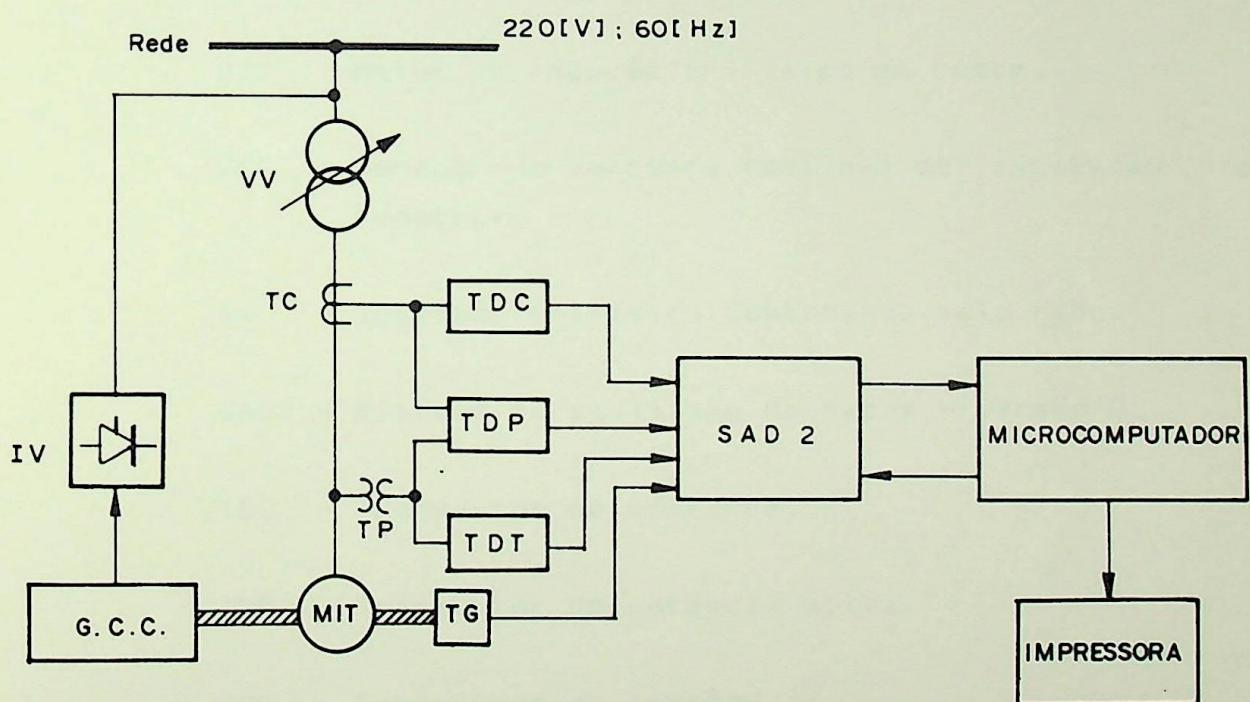


FIGURA 2 – Diagrama da montagem para obtenção dos resultados da Tabela 2

Na figura 2, tem-se:

VV - Variador contínuo de tensão.

TC - Transformador de corrente.

TP - Transformador de potencial.

MIT - Motor de indução trifásico em teste.

GCC - Gerador de corrente contínua de excitação independente.

IV - Inversor trifásico controlado pela rede.

SAD2 - Sistema de aquisição de dados - Versão 2.

TDC - Transdutor de corrente.

TDP - Transdutor de potência ativa.

TDT - Transdutor de tensão.

TG - Tacogerador.

3 - REALIZAÇÃO DOS TESTES

Os teste foram realizados com o motor operando com a carga variando de 60 a 100% da nominal.

4 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos dos testes foram apresentados na forma de tabela permitindo uma melhor visualização dos mesmos.

A Tabela 1 é constituída de valores calculados a partir dos resultados apresentados pela Versão 1.

A Tabela 2 é constituída de valores calculados a partir dos resultados apresentados pela Versão 2.

TABELA 1

Resultados obtidos utilizando a Técnica Digital						
n [rpm]	U ₁ [V]	I ₁ [A]	P ₁ [W]	FP	η [%]	P _{MEC} [W]
1.178	443,8	12,43	5.559	0,582	82,7	4.600
1.170	443,1	14,23	7.337	0,672	83,6	6.134
1.164	442,5	15,73	8.586	0,713	83,2	7.140
1.160	441,8	16,24	9.090	0,732	83,2	7.562

TABELA 2

Resultados obtidos utilizando a Técnica Analógica						
n	U_1	I_1	P_1	FP	η	P_{MEC}
[rpm]	[V]	[A]	[W]	-	[%]	[W]
1.178	442,3	12,4	5.519	0,581	83,3	4.595
1.170	441,7	14,1	7.322	0,679	85,7	6.272
1.164	441,1	15,6	8.599	0,721	86,4	7.429
1.160	441,5	16,1	9.113	0,731	86,5	7.883

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A experiência adquirida no decorrer deste trabalho possibilitou verificar com bastante certeza, a viabilidade do emprego do Sistema de Aquisição de Dados Com Multiplexagem face às características desejáveis observadas e que estão colocadas a seguir:

- Os resultados obtidos durante a realização dos testes mostraram-se em conformidade com aqueles apresentados pelo Sistema de Aquisição de Dados Sem Multiplexagem. O maior erro nos resultados foi de + 4,20% .
- Os transdutores utilizados são facilmente encontrados no mercado e não apresentam quaisquer dificuldades de instalação. Além disso, estes equipamentos facilitam muito o processo da multiplexagem, uma vez que apresentam como saída um nível DC proporcional à grandeza de entrada. Não obstante, observou-se um acentuado desvio do valor médio neste nível DC, o que torna ponderável o desenvolvimento de projetos destes equipamentos utilizando uma tecnologia mais avançada.
- A simplicidade do hardware da placa desenvolvida facilita muito uma eventual manutenção. Também o custo dos componentes foi substancialmente reduzido pela ausência de complexidade no projeto, bem como pela quantidade mínima de conversores A/D presentes no projeto.
- Aliada à facilidade de manuseio, a falta de obstáculos na obten-

ção de resultados, torna vantajosa a sua utilização em campo.

Entretanto é mister desenvolver outras placas que visem facilitar o uso do equipamento. Sob este aspecto podem ser elaborados os seguintes trabalhos:

- Projeto de transdutores de tensão alternada, corrente alternada e de potência ativa mais eficientes, isto é, com menor tempo de resposta e que apresentem um menor conteúdo harmônico no nível DC.
- Projeto de um transdutor de torque de bom desempenho e de menor custo que os que se encontram hoje no mercado.

Cabe também como sugestão a outros trabalhos, o desenvolvimento de uma sistemática para, com o uso do equipamento aqui desenvolvido, tornar possível a supervisão das condições de operação de motores em instalações industriais, evitando desta forma, o sobredimensionamento e o consequente desperdício de energia.

B I B L I O G R A F I A

- [1] - Shannon, C.E - "Communication in the Presence of Noise", Proceedings of the IRE, 37, pag ii; January 1949.
- [2] - Medeiros Filho, Solon de - "Fundamentos de Medidas Elétricas", 2^o edição, Guanabara - 1986 - Rio de Janeiro.
- [3] - Zuffo, João Antonio - "Subsistemas Digitais e Circuitos de Pulso", Edgard Blücher - 1981.
- [4] - "Definition and Measurement of Apparent Power Under Distorted Waveform Conditions" - Filipski, P.S.; and Ansenean, R. - Proceedings of 3rd International Conference on Harmonics in Power Systemys - 28/09 a 01/10/89 - Nashville, Indiana, USA.
- [5] - "Harmonic Power Flow Effect on Energy and Power Meters Accuracy - Actual and Future Instrumentation" - Emmanuel, Alexander Eigeles - Notas Técnicas referentes a palestra do IEEE Brasilcon'88 - Harmônicos em Sistemas Elétricos - Rio de Janeiro - FURNAS - Seção Rio de Janeiro - Conselho Brasil do IEEE - Novembro de 1988..
- [6] - C.Budeanu "Reactive and Fictitious Power", Publ. n^o 2 of the Rumanian National Institute of Bucaresti - 1927.
- [7] - "IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static-Power Converters" IEEE Project n^o 519, July 1979.

- [8] - Brigham, E. Oran "The Fast Fourier Transformer", Prentice - Hall, Inc; Englawood Cliffs, New Jersey - 1974.
- [9] - Sá, Jocélio Souza de - "Contribuição à Análise do Comportamento Térmico de Motores de Indução Trifásicos com Rotor do Tipo Gaiola", Tese de Doutorado - UNICAMP - 1989.

ANEXO 1

DADOS DE PLACA DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

$$P_N = 10 \text{ [cv]}$$

$$U_N = 440 \text{ [V]}, 60 \text{ [Hz]}$$

$$n_N = 1160 \text{ [rpm]}$$

$$I_N = 15 \text{ [A]}$$

$$I_p = 7,5 * I_N$$

$$F_S = 1,15$$

$$Reg = S1$$

$$Cat = N$$

$$Isol = F$$

$$Prot = I_p \text{ w } 55$$

DATA / /19
PROC.
PED.
LIV.
RS
.....

621.313.333:681.3.07(043.2)
ESTONIA 1 TÖMBS-660

FICHA 1

TOMBO:660

EFEI / Biblioteca Mauá

B518a

BERNARDES, Delvio Franco.

Análise do comportamento de motores de indução trifásicos com o uso de sistemas de aquisição de dados.

Data	Nº Registro	Data Devol.
20/01/2018	Ricardo Motta 0516	

EFEI

BIBLIOTECA MAUÁ

Esta publicação deverá ser devolvida dentro do prazo estipulado.

O leitor é responsável pela publicação
em seu poder.

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ

8200660



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA