



BR0544375



INIS-BR--3966

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

DESENVOLVIMENTO DE UM CARTÃO DIGITAL PARA SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DO PERÍODO EM REATORES DE PESQUISA

PAULO HENRIQUE FERRAZ MASOTTI

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear.

Orientador:

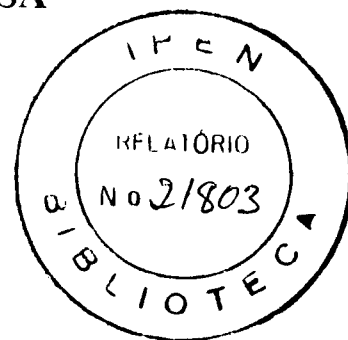
Prof. Dr. Adalberto José Soares

São Paulo

1999

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM CARTÃO DIGITAL PARA
SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DO PERÍODO EM
REATORES DE PESQUISA**



PAULO HENRIQUE FERRAZ MASOTTI

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de Mestre
em Ciências na Área de Reatores Nucleares
de Potência e Tecnologia do Combustível
Nuclear.**

**Orientador:
Prof. Dr. Adalberto José Soares**

São Paulo

1999

Dedicado à Rosa e a meus pais,
Neimer e Antonieta

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN-SP), pela cessão das instalações, dos equipamentos, pela permissão de acesso ao reator IEA-R1 e aos cursos de pós-graduação.

Ao Prof. Dr. Adalberto José Soares, pela orientação, incentivo e discussões durante a realização deste trabalho

Ao colega Eng. Carlos Alberto Loyola, da Supervisão de Operação de Reatores, pelo apoio durante a realização dos testes na mesa de controle do reator IEA-R1.

Ao colega Técnico Algeny V. Leite da Supervisão de Instrumentação e Controle, pela montagem dos circuitos eletrônicos do cartão desenvolvido.

Aos colegas da Supervisão de Instrumentação e Controle pelo apoio oferecido.

E a todos, enfim, que colaboraram direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

***DESENVOLVIMENTO DE UM CARTÃO DIGITAL PARA
SIMULAÇÃO DA VARIAÇÃO DO PERÍODO EM REATORES DE
PESQUISA***

PAULO HENRIQUE FERRAZ MASOTTI

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um cartão para ser usado em um "slot" de um microcomputador do tipo P.C. que permite avaliação do comportamento de um canal nuclear utilizado para monitorar a partida de reatores nucleares, em regime estacionário e durante transientes.

O resultados dos testes de bancada mostraram que o cartão desenvolvido apresenta precisão, com margem de erro inferior a 2%, na faixa estabelecida como operacional. Nos testes de campo, realizados no reator IEA-R1, ficou comprovado que o cartão atende plenamente aos objetivos propostos.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL CARD TO SIMULATE PERIOD TRANSIENTS IN RESEARCH REACTORS

PAULO HENRIQUE FERRAZ MASOTTI

ABSTRACT

This work presents the development of a card to be used in a “slot” of a micro-computer for avaluation of a nuclear channel used to monitor the start up of nuclear reactors.

The results of the bench tests showed good linearity and 2% error deviation in the entire range of operation.

Field tests, performed with the start up channel of IEA-R1 research reactor showed that the card is an excellent device to verify the performance of the channel during steady state, and transient conditions.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT.....	iii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO DO TRABALHO	6
3. RESUMO BIBLIOGRAFICO	9
4. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS	11
4-1 – Período de um reator nuclear	11
4-2 – Detalhamento de um canal de pulso (partida)	22
4-3 – Circuito do medidor de taxa de contagem	26
4-4 – Circuitos do medidor de período	31
4-5 – Sinais típicos do canal de partida de um reator de pesquisa....	34
5. ALGORITMO	36
6. REQUISITOS DE PROJETO DO CARTÃO DESENVOLVIDO	47

7. CARTÃO DESENVOLVIDO	51
7-1 – Características do cartão desenvolvido	51
7-2 – Diagrama de blocos do hardware	56
8. PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
8-1 Primeira fase de testes	65
8-2 Segunda fase de testes	75
8-1 Terceira fase de testes	88
9. ANÁLISE DE ERROS	112
10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	119
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
12. ANEXOS	129
12-1 Lista de material	129
12-2 Circuito Elétrico	134

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento da instrumentação de um reator nuclear é de grande importância, pois além de ser utilizada para controle do reator, a instrumentação tem a função de atuar na segurança e proteção do mesmo.

Entre os canais que monitoram a condição do reator, um dos mais importantes é aquele que monitora o fluxo neutrônico, uma vez que esta grandeza é diretamente proporcional à potência gerada pelo reator. Adicionalmente, um transiente obrigatório em todo reator nuclear é a passagem da condição de desligado para a condição de potência, operação esta denominada "partida do reator", e na qual o fluxo pode variar até 10 décadas. Para se ter uma partida segura é necessário garantir que o canal de partida, que monitora a partida do reator, responda correta e rapidamente, ou seja, que forneça o valor correto do fluxo neutrônico e acompanhe as variações bruscas do mesmo.

Para se monitorar o fluxo de nêutrons num reator, utiliza-se um detector ligado a um circuito eletrônico que lhe processa os sinais. O processamento pode ser na forma de pulsos, ou na forma de corrente, gerando um sinal em forma de tensão, cuja amplitude é proporcional ao fluxo.

Se um detector de nêutrons for conectado a um canal logarítmico, o sinal de saída será o logaritmo do fluxo de nêutrons. Este tipo de instrumento chamado de "log(n) meter", é particularmente usado na operação de partida de um reator nuclear quando o fluxo de nêutrons pode variar até 10 décadas /08/ /09/. Como esta variação pode ser muito brusca, além de se monitorar o valor do fluxo de nêutrons, monitora-se também a sua taxa de variação através da grandeza denominada período do reator e que é definido como sendo o tempo necessário para que o fluxo neutrônico (e conseqüentemente a potência do reator) seja multiplicado por um fator de e ($e = 2,71828\dots$).

O período de um reator é considerado essencial no controle do mesmo e deve ser mantido dentro de uma faixa aceitável já que um período muito pequeno pode colocar em risco a segurança do reator.

A variação da tensão na saída do circuito eletrônico utilizado para monitorar o fluxo neutrônico é detectada pelo medidor de período que gera dois novos sinais de tensão: um para o conjunto *comparador / biestável*, que informa o sistema de proteção do reator nuclear e, se necessário, promove o desligamento do reator; e outro para o *indicador de período*, localizado no painel da mesa de controle e que é graduado em segundos permitindo o seu acompanhamento pelo operador.

Um reator normalmente possui a sua potência monitorada por três canais: de partida, intermediário e de potência.

O canal de partida opera na faixa de pulso, com o reator entre 10^{-10} e 10^{-6} da potência nominal. Basicamente é constituído de um detector tipo câmara de fissão ou tipo ^{10}B , de um pré-amplificador, de um

amplificador, de um medidor de taxa de contagem (*rate meter*) e um medidor de período. Está ligado aos sistemas de proteção do reator fornecendo duas variáveis ao operador: potência e o período.

O canal intermediário atua na faixa entre o canal de partida e o canal de potência, numa faixa de 10^{-7} a 10^{-1} da potência nominal pois normalmente em um reator nuclear, as faixas de operação se sobrepõem permitindo que ao se efetuar a passagem de um canal para o outro este já se encontre operando e indicando os mesmos valores permitindo ao operador observar com antecedência as condições operacionais do canal seguinte.

Geralmente é constituído por uma câmara de ionização compensada (CIC) operando no modo de corrente, amplificador, circuitos medidores de corrente e normalmente um medidor de período. Ao operador da mesa de controle fornece informação da potência e período.

O canal de potência situa-se na última faixa de operação de um reator nuclear operando de 1% até uma potência normalmente acima dos 100% da potência nominal. Em geral é composto por um detector do tipo câmara de ionização não compensada, ligada a um circuito medidor de corrente, e ao operador informa a potência do reator podendo, se necessário, indicar também o período.

Normalmente os canais nucleares não são interligados entre si, gerando sinais isolados que são enviados ao sistema de proteção do reator nuclear (intertravamento). Quando algum dos parâmetros de potência predefinidos para cada canal (definidos como *set-points*) é ultrapassado ou quando o aumento de potência ocorrer em taxas acima das especificadas, o

sistema de proteção aciona dispositivos para desligamento do reator (*trips*) e eventualmente, o acionamento de sistemas de segurança.

Alguns reatores nucleares possuem um outro tipo de canal nuclear que é conhecido como canal Campbell. Este tipo de canal nuclear para reator tem a vantagem de operar desde a faixa de pulso até a faixa de potência, com um único detector, eliminando o canal intermediário. A utilização do processo, se dá por uma técnica especial, baseada no teorema de Campbell, e por essa razão denominada técnica Campbell.

Tendo em vista que o reator IEA-R1 possui um canal do tipo Campbell para monitorar a partida do reator, e que o mesmo faz parte do programa de testes deste trabalho, será apresentada a seguir uma breve explicação sobre este tipo de canal. Maiores detalhes sobre a técnica Campbell podem ser encontrados nas referências /04/ e /25/. Para a aplicação da técnica Campbell é essencial a utilização de detectores especiais que possam operar em toda a faixa de operação do reator.

Esses detectores, em geral são do tipo câmara de fissão e são acoplados a três circuitos eletrônicos distintos interligados entre si. Um dos circuitos opera no modo pulso e permite monitorar a partida do reator, como um canal de partida convencional. O segundo circuito começa a operar no final da faixa de partida e mede o valor quadrático médio (*Mean Square Value*) do sinal do detector operando em modo corrente, uma vez que, conforme pode ser visto nas referências /04/ e /25/, esse valor é proporcional ao fluxo neutrônico do reator. A faixa de operação do segundo circuito é denominada faixa Campbell e, em termos práticos, substitui o canal intermediário e de potência de um reator e mede a corrente gerada pelo detector, como um canal intermediário e de potência convencional.

A técnica Campbell apresenta algumas desvantagens, sendo a principal delas a dificuldade para calibrar os canais de forma adequada, pois exige duas calibrações: uma para o canal pulso e outra para o canal Campbell. Na transição de um canal para o outro, dependendo dos circuitos utilizados, os indicadores podem apresentar leituras com baixa confiabilidade.

2. OBJETIVO DO TRABALHO

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um dispositivo que permita avaliar o correto funcionamento dos circuitos eletrônicos de um canal nuclear com detector operando no modo pulso, e utilizado para monitorar a partida de um reator nuclear

O dispositivo de tecnologia digital e compatível com micro computadores da linha IBM-PC/AT, deve ser executado com base em um único cartão, com tecnologia digital, sem necessidade de equipamentos externos, e permitir, entre outras, as seguintes funções:

- Verificar o correto funcionamento dos circuitos medidores da taxa de contagem (potência) e período, em regime estacionário e em transientes.

- Verificar o correto ajuste dos níveis de referência (*set-points*) dos circuitos medidores de potência e período para a tomada de ações de desligamento do reator.

- Medir o tempo de resposta dos circuitos medidores de potência e período.

- Verificar a linearidade da resposta do reator à uma função de característica exponencial com expoente constante em 6 décadas (de 10^0 até 10^5).

- Facilitar a calibração na transição da faixa de pulso para região Campbell.

Para tanto, o dispositivo deve, permitir a geração de sinais que simulem os pulsos do detector de nêutrons e que possam ser aplicados à entrada do canal de partida, de forma a simular transientes operacionais para verificação do desempenho do canal de partida, ao mesmo tempo em que monitora a saída dos respectivos circuitos medidores de potência e período do reator.

Os pulsos gerados devem ser de largura e amplitude constantes e devem ser aplicados em tempos cada vez menores simulando uma função exponencial do tipo $f=A_0e^{(t/T_r)}$, varrendo a faixa de frequências de 1Hz à 300KHz.

Os sinais simulando os pulsos do detector serão aplicados à entrada “teste” do pré-amplificador e a monitoração dos circuitos medidores de potência e período será feita através das saídas da mesa de controle, que possui saídas de tensão para taxa de contagem, para a indicação do período e uma saída de pulso que representa o número de contagens que a mesa está recebendo do pré-amplificador.

Portanto, o conjunto *hardware* e *software* deve gerar pulsos numa frequência que pode ser constante ou variar de forma a simular uma função exponencial. Adicionalmente deve realizar a aquisição de dados das

três variáveis da mesa de controle (taxa de contagem, período e contagem obtida através da saída de pulso).

O dispositivo deve ser construído em cartão a ser inserido em um dos *slot* dos microcomputadores do tipo PC. Um *software* dedicado, deve efetuar o controle do cartão. Os dados devem ser armazenados em arquivos para uma análise detalhada pelos *softwares* matemáticos existentes.

3. RESUMO BIBLIOGRÁFICO

Para iniciar este trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica na qual se obteve os primeiros informes e detalhes a respeito das técnicas mais comuns relacionadas com os canais de partida dos reatores nucleares.

Como a área nuclear possui mais de cinquenta anos, os circuitos eletrônicos que realizavam esta função foram modernizando-se na medida em que ocorreram os avanços tecnológicos.

Por volta dos anos 50 surgiram circuitos /02/ /03/ que ainda hoje se encontram em funcionamento pela grande simplicidade e facilidade de manutenção.

As pesquisas mostraram que a área nuclear também está incorporando novas tecnologias, porém de modo mais lento e cuidadoso, uma vez que a aplicação de circuito digitais exige uma boa avaliação de sua confiabilidade antes de serem utilizados em novos projetos /10/ /11/ /13/.

Nas pesquisas bibliográficas verificou-se a existência de muitos circuitos que medem a potência do reator. Um dos tipos mais utilizados para medir a taxa de contagem (*rate-meter*) utiliza uma configuração denominada

bomba de diodos /02/ e /03/, semelhante ao que é utilizado pelo canal nuclear, que monitora a partida do reator IEA-R1, e que será descrito no capítulo 4.

Com relação ao circuito do medidor de período é possível notar-se uma evolução nestes medidores, porém eles basicamente realizam a diferenciação do sinal de saída do medidor taxa de contagem. Estes circuitos diferenciadores são bastante semelhantes aos utilizados no medidor de período do reator IEA-R1 e que serão descritos no capítulo 4.

Atualmente com os micro processadores /13/ sendo utilizados em larga escala em várias áreas, também tem sido objeto de análise e avaliação de seu emprego de modo mais intenso nesta área.

Já existem trabalhos teóricos /27/ utilizando processamento digital baseado em novos algoritmos, com sustentação no princípio do teorema de Campbell, que poderão, em futuro próximo, melhorar as técnicas hoje utilizadas para este tipo de canal.

Na literatura pesquisada não foi identificada proposta de desenvolvimento de um equipamento que permita a avaliação do comportamento de um canal de partida de um reator nuclear, através da geração um sinal de digital de característica exponenciais, conectado em um microcomputador da linha PC .

4. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

4-1 - Período de um reator nuclear

Uma das questões básicas da utilização da energia nuclear é o de se controlar a reação em cadeia que ocorre no núcleo do reator.

A condição para que a reação em cadeia se processe indefinidamente é que após a interação do nêutron incidente com o elemento combustível, este libere pelo menos um nêutron que venha a causar uma nova fissão e que por sua vez também libere mais um nêutron que cause mais uma nova fissão e assim sucessivamente.

Para monitorar o processo de reação em cadeia, são utilizados instrumentos que medem o comportamento do fluxo neutrônico no interior do núcleo, monitorando a taxa de variação do fluxo neutrônico no tempo, e controlando a sua potência através da atuação de dispositivos (barras de controle) que são acionados a partir de malhas de controle predefinidos.

Em situações de emergência estes instrumentos devem imediatamente gerar sinais para desligar o reator de forma automática, pela inserção das barras de controle e segurança no núcleo.

Para se avaliar o processo da reação em cadeia define-se o parâmetro k , que é chamado de fator de multiplicação /05/ /08/ /16/, e que permite a determinação do estado de operação de um reator em um dado instante. O parâmetro k é definido como sendo:

$$k = (\text{prod. de nêutrons numa geração}) / (\text{consumo de nêutrons na mesma geração}) \quad (4-1)$$

Onde, por consumo entende-se os nêutrons absorvidos no combustível e nos materiais estruturais e os nêutrons que “escapam” do núcleo.

Se $k = 1$, o reator é definido como estando em estado crítico e a reação em cadeia se processa indefinidamente, se $k < 1$, diz-se que o reator esta operando em estado subcrítico e o fluxo neutrônico irá diminuindo com o tempo e se $k > 1$ dizemos que o reator esta super crítico e o fluxo neutrônico cresce com o tempo.

Um outro parâmetro de interesse é a reatividade, que é definida como /08/ /16/:

$$\rho = (k - 1) / k \quad (4-2)$$

Da mesma forma como interpretamos k , se a reatividade de um reator for zero (0), o reator está estável; se a reatividade for positiva, ($k > 1$) o fluxo cresce com o tempo; e se a reatividade for negativa ($k < 1$) o fluxo diminui com o tempo.

Num reator nuclear existem dois tipos de nêutrons: os nêutrons prontos e os nêutrons atrasados. Nêutrons prontos são aqueles produzidos diretamente no processo de fissão, e nêutrons atrasados são aqueles produzidos pelo decaimento de produtos de fissão.

Considerando que para o ^{235}U os nêutrons atrasados podem ser divididos em seis grupos, de acordo com a constante de decaimento dos respectivos produtos de fissão, a equação que rege a dinâmica da densidade de nêutrons no núcleo do reator é dada por /05/.

$$\frac{dn}{dt} = (\rho/\Lambda)n - (\beta/\Lambda)n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (4-3)$$

Onde β é a fração (total) de nêutrons “atrasados” emitidos no processo de decaimento de produtos de fissão, λ_i é a constante de decaimento dos produtos de fissão associadas ao grupo i que decaem emitindo nêutrons “atrasados”, Λ é o tempo entre duas gerações consecutivas de nêutrons e C_i é a concentração dos produtos de fissão que emitem nêutrons atrasados do grupo i .

Para explicar o processo dinâmico envolvido, podemos simplificar a equação 4-3 adotando-se apenas um grupo de nêutrons atrasado e se desconsiderarmos os efeitos da realimentação da temperatura na dinâmica de funcionamento de um reator nuclear, a equação que rege a densidade de nêutrons $n(t)$ (e consequentemente o fluxo neutrônico $\Phi(t)$) no interior do reator é dada por /05/:

$$\frac{dn(t)}{dt} = ((\rho - \beta)/\Lambda)n(t) + \lambda C \quad (4-4)$$

Neste modelo, muitas vezes utilizado para o estudo da dinâmica de reatores de pesquisa, λ representa a constante de decaimento devidamente ajustada dos produtos de fissão que emitem nêutrons no processo de decaimento.

A equação 4-4 também pode ser escrita da seguinte forma

$$dn(t)/dt = (\rho/\Lambda)n(t) - (\beta/\Lambda)n(t) + \lambda C \quad (4-5)$$

Ocorre que no início de um transiente o segundo e terceiro termos da equação 4-5 se cancelam, e a solução de $n(t)$ pode ser aproximada por /08/ 17/:

$$n(t) = n_0 e^{(\rho/\Lambda)t} \quad (4-6)$$

onde: n_0 é a densidade inicial de nêutrons (por cm^3).

$n(t)$ é a densidade de nêutrons após um intervalo de tempo “t”.

Por esta equação se observa que, no caso de uma inserção de reatividade positiva ($\rho > 0$), no início de um transiente, a densidade de nêutrons aumenta exponencialmente com o tempo e como a taxa de fissão no núcleo de um reator é diretamente proporcional a densidade de nêutrons, então podemos dizer que no início de um transiente a potência de um reator segue um comportamento exponencial numa aproximação chamada de *prompt jump*.

Após a fase inicial do transiente a diferença entre o terceiro e segundo termo torna-se significativa, e tem valor negativo (no caso de uma inserção de reatividade positiva) que diminui a taxa de crescimento da

densidade de nêutrons. O fato da diferença entre o terceiro e o segundo termo ser negativa, justifica-se porque, no caso de uma reatividade positiva existem mais "precursores" sendo formados do que decaindo.

No modelo detalhado, com 6 grupos de nêutrons atrasados, o conjunto de equações que definem a dinâmica do reator, desprezando efeitos de realimentação, é dada por:

$$d(n(t))/dt = (\rho/\Lambda)n(t) - (\beta/\Lambda)n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \quad (4-7)$$

$$d(C_1(t))/dt = (\beta_1 n(t))/\Lambda - \lambda_1 C_1 \quad (4-8)$$

$$d(C_2(t))/dt = (\beta_2 n(t))/\Lambda - \lambda_2 C_2 \quad (4-9)$$

$$d(C_3(t))/dt = (\beta_3 n(t))/\Lambda - \lambda_3 C_3 \quad (4-10)$$

$$d(C_4(t))/dt = (\beta_4 n(t))/\Lambda - \lambda_4 C_4 \quad (4-11)$$

$$d(C_5(t))/dt = (\beta_5 n(t))/\Lambda - \lambda_5 C_5 \quad (4-12)$$

$$d(C_6(t))/dt = (\beta_6 n(t))/\Lambda - \lambda_6 C_6 \quad (4-13)$$

As equações 4-7 à 4-13 formam um sistema que pode ser escrito em notação matricial como:

$$d(\underline{x}(t))/dt = M \underline{x}(t) \quad (4-14)$$

onde $\underline{x}(t)$ é o vetor:

$$\underline{x}(t) = \begin{bmatrix} n(t) \\ C_1(t) \\ C_2(t) \\ C_3(t) \\ C_4(t) \\ C_5(t) \\ C_6(t) \end{bmatrix}$$

e M é uma matriz dada por:

$$M = \begin{bmatrix} (\rho - \beta)/\Lambda & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 & \lambda_6 \\ \beta_1/\Lambda & -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2/\Lambda & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_3/\Lambda & 0 & 0 & -\lambda_3 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_4/\Lambda & 0 & 0 & 0 & -\lambda_4 & 0 & 0 \\ \beta_5/\Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_5 & 0 \\ \beta_6/\Lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda_6 \end{bmatrix}$$

É possível demonstrar que a solução para $n(t)$ é do tipo:

$$n(t) = A_0 e^{t\omega_0} + A_1 e^{t\omega_1} + \dots + A_6 e^{t\omega_6} \quad (4-15)$$

onde $\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_6$ são os sete autovalores da matriz M e $A_0, A_1, \dots, A_6$, são constantes que são determinadas pelas condições iniciais do reator /08/ /05/, ou seja, a potência em um reator nuclear geralmente segue uma curva do tipo exponencial e é possível se obter curvas específicas para uma determinada configuração do núcleo de um reator /08/.

A equação 4-15 reproduzida sob a forma de fluxo de nêutrons pode ser escrita como /16/:

$$\Phi_T(t) = \Phi_{T0}(A_0 e^{(\omega_0 t)} + A_1 e^{(\omega_1 t)} + \dots + A_6 e^{(\omega_6 t)}) \quad (4-16)$$

Para valores positivos de reatividade ($k_{ef} > 1$), dos sete autovalores apenas ω_0 é positivo, e os demais são negativos o que significa que após a fase de transiente inicial, exceto pelo termo em ω_0 , todos os demais termos da equação 4-16 tenderão rapidamente a zero, devido aos valores negativos de ω , ou seja estes termos contribuem de forma transitória com o fluxo neutrônico e são desprezíveis em relação ao primeiro termo, que por ser positivo, aumenta constantemente com o tempo. Assim, após transcorrido um pequeno intervalo de tempo, a equação 4-16 fica reduzida somente ao primeiro termo

$$n(t) = A_0 e^{\omega_0 t} \quad (4-17)$$

O parâmetro ω tem a dimensão do inverso do tempo (1/s), e o seu inverso é definido como sendo o período (Tr) do reator, desde que haja transcorrido tempo suficiente para que as contribuições dos termos transitórios desapareçam, ou seja, após o transiente inicial, Tr é dado por:

$$Tr \equiv 1/\omega_0 \quad (4-18)$$

e recebe o nome de período do reator /08/.

Numa análise quantitativa temos que se ρ é negativo ($\rho < 0$), todos os autovalores da matriz M são negativos; neste caso, a expressão do fluxo em função do tempo (eq. 4-16) estará constituída por sete termos com expoente negativos, ou seja, todos decrescem com o tempo. Por ter ω_0 o valor numérico mais baixo, o primeiro termo diminuirá em ritmo mais lento que os

seis restantes e conduzirá em definitivo o reator, a um período estável (negativo), também igual a $1/\omega_0$.

Para se ter uma idéia de como pode variar o fluxo de nêutrons em um reator utilizaremos um exemplo apresentado na referência /17/. Neste caso assumimos inicialmente a equação $n = n_0 e^{(\rho/\Lambda)t}$ como indicando um reator comportando-se como se todos os nêutrons fossem “prontos”. Vamos assumir que temos um meio de multiplicação crítico com “ Λ ” de 10^{-4} s, o valor aproximado para um reator com uma mistura homogênea de ^{235}U e H_2O à temperatura ambiente.

Se k sofrer um aumento de 1,000 para 1,001 inicialmente o período será:

$$Tr = \Lambda/\rho \quad (4-19)$$

Como, $\Lambda = 10^{-4}$ e $\rho = (k-1)/k$, logo temos, $\rho = 0,001$.

Portanto, voltando à equação anterior tem-se:

$$Tr = 10^{-4}/0,001 \text{ ou seja,}$$

$$Tr = 10^{-1}\text{s ou } 0,1\text{s}$$

Assim, se no início a potência for $P = 1\text{MW}$ e se não houver outros fatores influenciando a taxa de crescimento da densidade de nêutrons, após 1 segundo teríamos a potência multiplicada por um fator de e^{10} , ou seja, 22000 MW. Com o passar do tempo, o termo $-((\beta/\Lambda)n - \lambda C)$ começa a ficar significativo, o que faz com que na realidade a potência siga uma exponencial dada por:

$$P(t) = P_0 e^{(s_1 t)} \quad (4-20)$$

Onde /05/:

$$s_1 = (-((\beta - \rho)/\Lambda + \lambda) + \sqrt{((\beta - \rho)/\Lambda + \lambda)^2 + 4\rho\lambda/\Lambda})/2 \quad (4-21)$$

Da equação 4-21 pode-se estabelecer algumas hipóteses para alguns valores de ρ , desta forma:

Para pequenos valores de ρ :

$$s_1 = (-x + \sqrt{x^2 + \Delta})/2 \quad (4-22)$$

onde $x = (((\beta - \rho)/\Lambda) + \lambda)$ pode ser aproximado por:

$$s_1 \approx (-x + x [1 + \Delta/2x^2])/2 \quad (4-23)$$

$$s_1 \approx \Delta/4x = (4\rho\lambda/\Lambda)/4((\beta - \rho)/\Lambda + \lambda) = \rho\lambda/\Lambda((\beta - \rho)/\Lambda + \lambda) \quad (4-24)$$

para valores de ρ inferior a β , s_1 pode ser aproximado por:

$$s_1 \approx \rho\lambda/(\beta - \rho + \lambda\Lambda) \text{ onde o termo } \lambda\Lambda \text{ tende a zero.} \quad (4-25)$$

Logo assumindo os seguintes valores:

$$\rho = 0,001$$

$$\Lambda = 10^{-4}$$

$$\beta = 0,0065$$

$$\lambda = 0,08$$

e substituindo na equação 4-25, tem-se os valores;

$$s1 \approx (0,001 \times 0,08)/0,005$$

$$s1 \approx 0,016$$

o que significa que, neste arranjo, um degrau de 0,001, na reatividade faz com que o fluxo varie com $e^{0,016t}$.

Para o caso de ρ ser igual a β :

$$s1 = (-\lambda + \sqrt{4\rho\lambda/\Lambda})/2 \quad (4-26)$$

$$s1 = (0,08 + \sqrt{(4 \cdot 0,0065 \cdot 0,08)/10^{-4}})/2$$

$$s1 \approx 2,24$$

ou seja: neste caso a potência cresce com $e^{2,24t}$

O valor de $s1 \approx 0,016$ embora pareça pouco, significa que a potência aumenta com uma taxa de 1,6% por segundo e se considerarmos o caso em que $\rho = \beta$, verificamos que a potência cresce com um fator da ordem de $e^{2,24t}$, ou seja, em 1 segundo a potência é multiplicada por 9,4.

Para o caso de ρ ser maior que β :

19. Neste caso vale a aproximação *prompt jump* vide exemplo em 4-.

Maiores informações sobre a dinâmica de reatores nucleares pode ser encontrada na literatura ou nas referências /17/, /08/ deste trabalho.

4-2- Detalhamento de um canal de pulso (partida)

Apresentamos a seguir um esquema simplificado onde se pode verificar o conjunto núcleo/barra de controle/mecanismo de acionamento de barras e o conjunto denominado instrumentação nuclear, onde se encontram os circuitos eletrônicos que realizam a monitoração e o controle do reator tais como os circuitos do canal de partida, canal Campbell, canal de proteção/segurança, controle automático de potência, etc. Daremos ênfase aos circuitos que compõem o canal de partida do reator e este bloco, será detalhado nos itens a seguir.

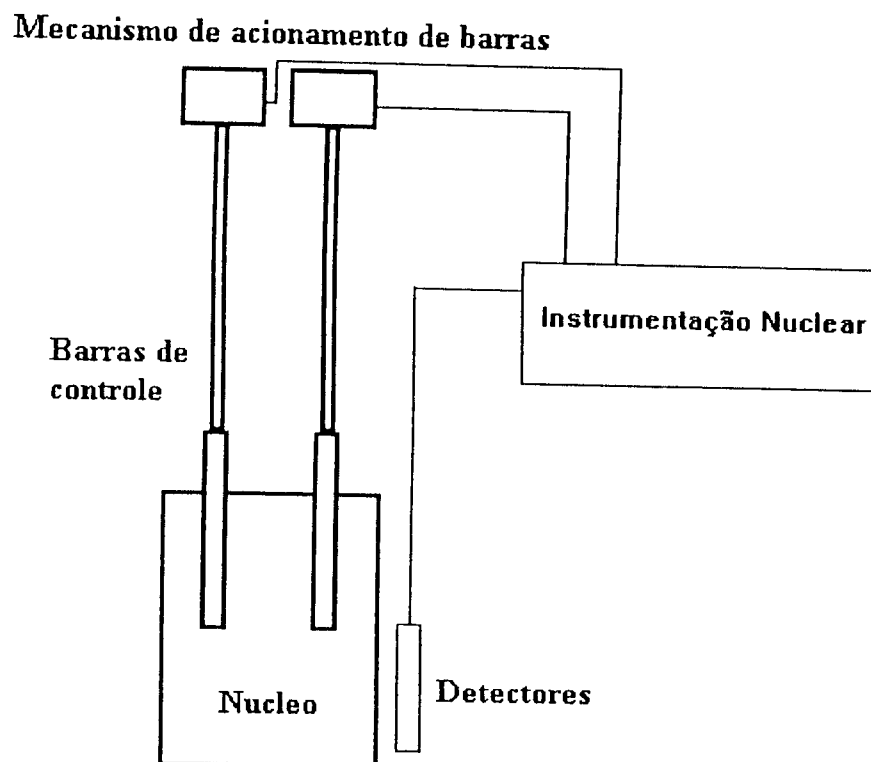


Figura 4-1 - Diagrama de blocos simplificado dos mecanismos de controle e medida de parâmetros nucleares do reator.

Dos circuitos eletrônicos existentes no bloco instrumentação nuclear, estamos interessados no canal de partida e particularmente no medidor de período, faremos uma breve descrição deste canal. Os seus diversos componentes estão apresentados na figura 4-2 que apresenta o diagrama de blocos típico de um canal de partida que é constituído dos seguintes blocos /09/.

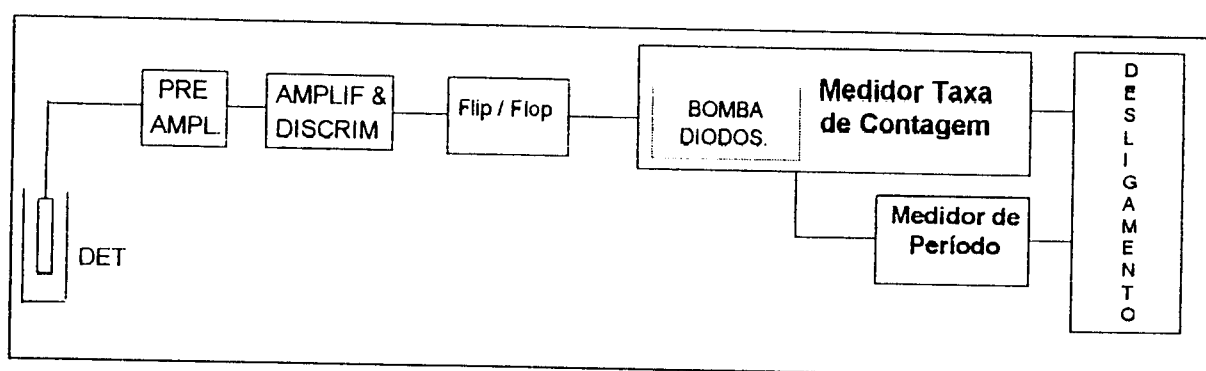


Figura 4-2 - Diagrama de blocos típico de um canal de partida utilizado em reatores nucleares

A figura 4-3 permite ilustrar o conceito envolvido, lembrando que a potência nada mais é do que o fluxo neutrônico (medido pelos detectores nucleares) vezes uma constante.

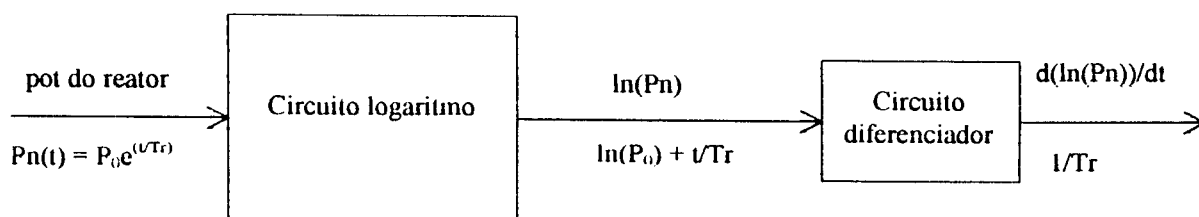


Figura 4-3. Diagrama de blocos dos circuitos logaritmo e período.

A seguir faremos alguns comentários a respeito dos blocos que compõem a figura 4-2.

. Detector – é um sensor composto por um cilindro, com dois eletrodos (positivo e negativo) onde se deposita uma camada de material sensível a nêutrons. Para cada nêutron que interage com esse material emite uma partícula que ioniza um gás, gerando uma corrente elétrica. Esta corrente pode ser processada na forma de pulsos ou na forma de uma corrente média, dependendo do tipo de detector e do circuito eletrônico utilizados. Para partida do reator em geral usa-se o modo pulso.

. Pré-amplificador - devido ao baixo valor do pulso gerado no detector, o mesmo é levado a um pré-amplificador que realiza uma primeira amplificação do pulso de corrente e faz a adaptação das impedâncias entre o detector e os circuitos eletrônicos antes do mesmo ser transmitido a longas distâncias, evitando que haja perda do sinal bem como a introdução de ruídos.

. Amplificador e discriminador – fornece uma segunda amplificação do sinal realizando uma discriminação sinal/ruído e formata os pulsos de modo a permitir que os mesmos possam ser utilizados pelos demais estágios do canal de pulso.

. Flip flop - a seguir o sinal é aplicado a um circuito digital do tipo flip flop, para permitir que os estágios seguintes possam utilizá-lo estabelecendo um padrão de forma de onda para uso posterior.

. Medidor taxa de contagem - o estágio medidor de taxa de contagem é composto de circuitos que contam o número de pulsos no tempo. Geralmente, os tipos utilizados em reatores são compostos de circuitos que

convertem os pulsos em sinais de corrente contínua, proporcionais a taxa de contagem.

. Medidor de Período – é um circuito que mede a taxa de variação da potência do reator no tempo.

. Desligamento – Neste bloco estão os circuitos que realizam o desligamento do reator.

4-3 - Circuito do medidor de taxa de contagem

Existem inúmeros circuitos que podem fornecer o logaritmo da taxa de contagem. Estes circuitos transformam o sinal de entrada, em um sinal de saída proporcional ao logaritmo da taxa de contagem, permitindo a leitura pelos instrumentos de medida convencionais. Existem vários tipos.

Um dos tipos de circuitos conhecido mais comuns é o tipo bomba de diodos e que é encontrado em muitas instalações nucleares, inclusive no reator IEA-R1.

Existem muitos outros tipos de circuitos, que efetuam o logaritmo da taxa de contagem, utilizando-se amplificadores transistorizados e ou amplificadores operacionais [11]. Outras técnicas tem sido desenvolvidas e empregadas para o cálculo do logaritmo da taxa de contagem.

Deve-se ressaltar que como o medidor de taxa de contagem fornece uma saída que é função da taxa de contagem dos pulsos de entrada e como a faixa de operação é de várias décadas, então essa função é a função logarítmica, também conhecido como canal logaritmo (canal log).

A seguir faremos uma descrição resumida do funcionamento de uma bomba de diodos.

A bomba de diodos consiste basicamente de um circuito onde um capacitor fonte (cf) se carrega, quando submetido a um pulso de tensão na sua entrada. Quando este pulso de tensão, retorna a zero, o capacitor (cf) transfere

suas cargas a um outro capacitor tanque (ct). Este capacitor (ct), se descarrega através do resistor que esta conectado em paralelo. O circuito básico é mostrado na figura 4-4.

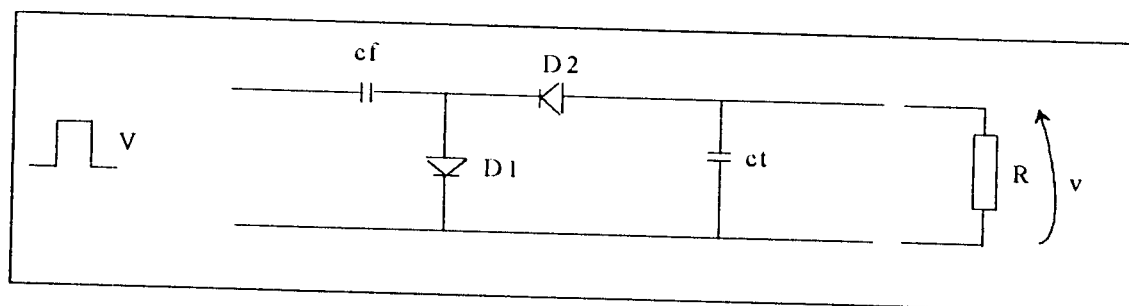


Figura 4-4 - Esquema simplificado de um circuito tipo bomba de diodos

Se o valor de R e cf escolhido for adequado, no caso de um trem de pulso se conseguirá um valor médio que pode ser condicionado para atuar em outros circuitos efetuando outras funções, tais como o desligamento do reator.

Apresentamos a seguir algumas equações referentes ao circuito da figura 4-4.

A tensão média que se obtêm em R é dada por /02/.

$$v = (V \cdot n \cdot c_f \cdot R) / (1 + n \cdot c_f \cdot R) \quad (4-27)$$

onde:

v = tensão nos terminais do capacitor

n = taxa de eventos

V = tensão de entrada

R = resistência de carga do capacitor

C_f = capacitor fonte

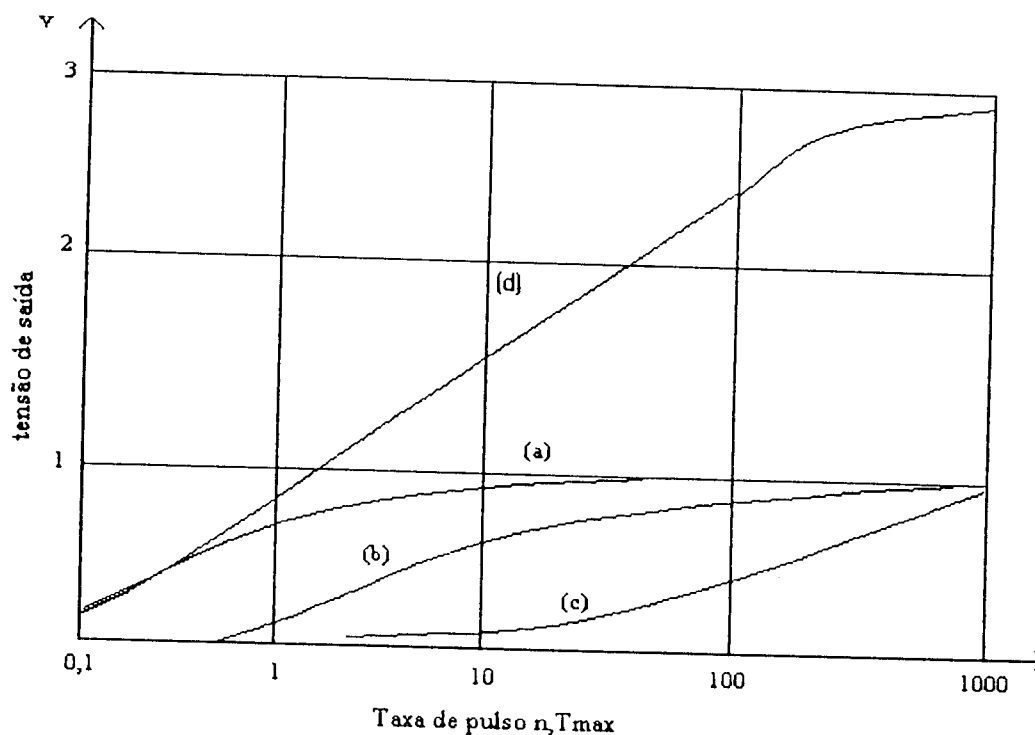


FIGURA 4-5 – Bomba de Diodo – Relação entre a tensão de saída e a taxa de pulso do circuito bomba de diodo.

Transcreveremos abaixo, uma pequena parte da descrição existente na referência 2, sobre as características deste circuito.

O circuito mostrado na figura 4-4 pode ser usado para construir um medidor taxa de contagem não linear. A curva *a* na figura 4-5 mostra a relação entre *n* e *v*, onde *n* está plotado em uma escala logarítmica, e ela mostra que está longe de uma curva logarítmica. As curvas *b* e *c* mostram as características do circuito bomba de diodo, no qual o valor de $R \cdot C_f$ foram reduzidos por um fator de 10 e 100 respectivamente, e a curva *d* mostra a soma das tensões dos três circuitos. Esta curva é quase linear em uma faixa de taxas de contagem de 1 até 100, tal que a relação entre a taxa de pulsos e a soma das três tensões da bomba de diodo, é aproximadamente logarítmica nesta faixa. O tamanho da parte linear na curva *d* pode ser incrementado

indefinidamente, pela adição de tensões de outros circuitos de bomba de diodo de maneira similar. Este é o princípio no qual o medidor taxa de contagem está baseado.

Como um canal de partida necessita cobrir 5, 6 ou 7 décadas, isto só é possível através de circuitos que calculem o logaritmo do sinal de entrada. Como geralmente as células da bomba de diodos são projetadas para apresentar 1V/década referencia /02/ /19/, se forem colocados várias destas células em paralelo, por exemplo 6 ou 7 e somar-se as tensões de cada uma, será possível a obtenção um sinal de saída (curva), semelhante a uma curva logarítmica, com um desvio que chega ao redor de $\pm 1\%$, referência /02//03/.

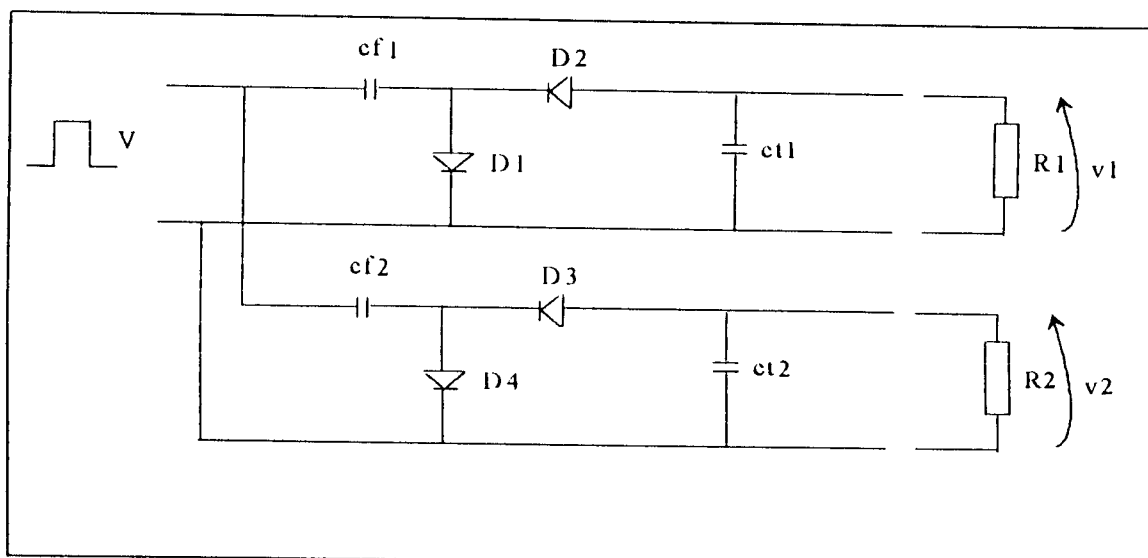


Figura 4-6 - Esquema simplificado de um bomba de diodo com duas células.

Pode ser demonstrado em /02/ que se a bomba de diodos é alimentada por uma fonte de baixa impedância, o aumento da tensão do circuito tanque "i" com o tempo é dado por:

$$v_i = [V.n.T/(1 + n.T)] \cdot \{1 - e^{-(n.T + 1/C_{di}.R).t}\} \quad (4-28)$$

De fato a velocidade de resposta varia com a escala lida, e em qualquer ponto da escala é limitado somente pela flutuação máxima tolerável /02/.

Porém como a constante de tempo $Tr = RC$ varia de célula para célula da bomba de diodos, - para as freqüências mais baixas é da ordem de segundos e para as freqüências mais altas é da ordem de milisegundos (10s à 50 ms.) - o tempo de resposta da bomba de diodos vai depender da freqüência de ocorrência dos pulsos.

Quando as freqüências aumentam, cada uma destas células caminha para a tensão de saturação e quando todas elas atingem essa tensão, a bomba de diodos passa a apresentar distorção em relação a curva logarítmica

Com os sinais obtidos na saída da bomba de diodos ou dos circuitos "ln" obtêm-se um "medidor de taxa de contagem" que fornece a taxa de contagem no tempo. Se colocarmos na saída do "medidor de taxa de contagem" um circuito comparador com o seu nível de comparação ajustável ("set-point") quando este nível de comparação for superado, ocorrerá o desligamento do reator por sobre-potência.

4-4 – Circuitos do medidor de período

Como já visto no capítulo 4.1, variações da reatividade em um reator nuclear, leva a uma variação na densidade de nêutrons, (que por sua vez é proporcional ao fluxo de nêutrons e à potência do reator). Como a faixa de operação de um reator, desde a sua partida até a condição de potência alcança cerca de 10 décadas de variação do fluxo neutrônico, para se monitorar a partida de um reator, e o seu período, geralmente se utiliza um circuito logaritmico cujo resultado é o logaritmo da potência. Se conectarmos a saída de um medidor “log(n)” a um circuito diferenciador RC, a corrente deste último vem a ser uma medida da derivada do log(n), com relação ao tempo, $d(\log(n))/dt$ /08/, e como a recíproca do período do reator é igual a $d(\ln(n))/dt$, resulta que a combinação de um medidor de log(n) e de um circuito RC fornece um sinal de saída que é proporcional a $1/T_p$, portanto o período. vide figura 4.7.

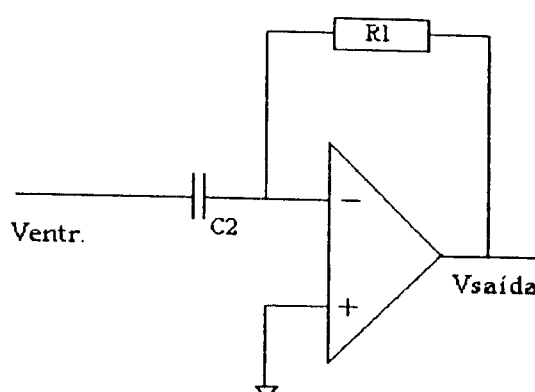


Figura 4-7. Esquema simplificado de um circuito diferenciador

A equação que rege o comportamento de um circuito diferenciador puro é dado por:

$$V_{SAÍDA} = -R1.C2.d(V_{ENTR.})/dt \quad (4-29)$$

O circuito que contém o diferenciador é chamado de medidor de período e o seu sinal de saída é conectado a um indicador de período e a um circuito biestável. Este circuito biestável permite ajustar um valor a partir do qual, fornecerá um sinal que efetuará o desligamento do reator.

Se for necessário trabalhar com a função $\ln$ ao invés da função $\log$, é possível aos circuitos eletrônicos efetuarem esta conversão, pois a relação entre $\ln$ e $\log$ ($\ln/\log$) é de 2,3025....

A grande dificuldade apresentada no circuito diferenciador, figura 4-7 é a escolha dos valores de $R.C$. Se os valores de $R.C$ forem muito baixos, o circuito atua em qualquer pequena variação de potência, levando o reator a desligamentos desnecessários. Se o valor de $R.C$ for muito alto o circuito torna-se muito lento, ocorrem menos desligamentos espúrios, porém o circuito pode dificultar a detecção de uma rápida excursão de potência. É necessário encontrar um valor adequado de $R.C$. Este tipo de circuito possui um problema inerente que é o de amplificar em demasia o ruído existente em sua entrada, o que também pode levar a desligamentos desnecessários, além de existir a possibilidade de ocorrer saturação no circuito de saída, prejudicando o seu funcionamento.

Para se evitar tais problemas, geralmente se coloca um capacitor ($C1$) no ramo de realimentação do circuito do amplificador diferencial (normalmente um amplificador operacional de boa qualidade) que em

conjunto com o resistor de realimentação formam um circuito integrador. Algumas vezes também é colocado um resistor (R_2) na entrada do circuito diferenciador para diminuir o efeito do ruído de alta frequência [28], conforme indicado na figura 4-8.

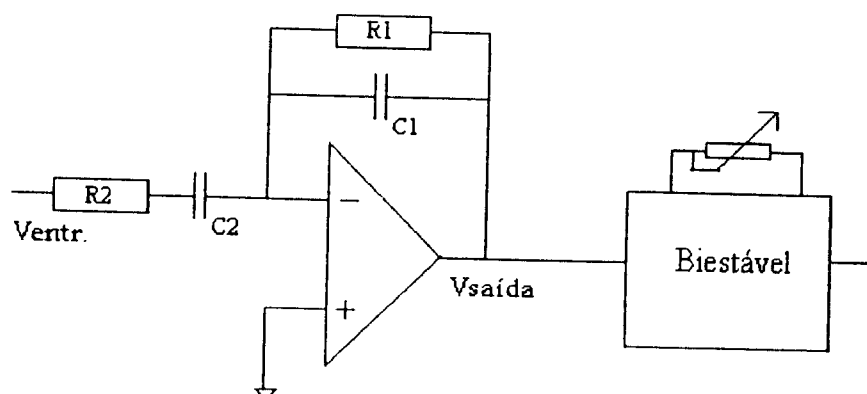


Figura 4-8 - Esquema prático de um circuito diferenciador com amplificador operacional e o circuito biestável

O circuito medidor de período está conectado a um circuito biestável e este possui ajustes (*set points*) que permitem escolher o valor adequado em que o período deve atuar para efetuar o desligamento do reator. Por exemplo, o circuito de período poderá ser ajustado para desligar o reator quando o período for de 12, 10, 5, 3 segundos, etc.

4-5 - Sinais típicos do canal de partida de um reator de pesquisa:

Os exemplos indicados a seguir referem-se à instrumentação utilizada no canal de partida do reator IEA-R1 do IPEN que opera com uma câmara de fissão com as seguintes características para operar na região de pulso:

Tensão de operação: 200 à 800 Vcc

Dimensões: 29,2 x 5 cm

Máximo fluxo de nêutrons térmico: $1,4 \times 10^5$ nv

Impedância: $10^9 \Omega$

Capacitância: 150 pF

Sensibilidade: 0,7 cps/nv

Materiais: Alumínio

Isolação: Al_2O_3

Comprimento nominal do elemento sensível: 15,2cm

Conforme já mencionado, o medidor de taxa de contagem, geralmente obedece a uma curva logarítmica, com a relação de 1V/década, logo fazendo uma relação entre a potência do reator e a tensão de saída no conector da mesa de controle. Lembrando que o fundo de escala é de 10Vcc e que isto corresponde à uma potência de 5MW (100% da potência nominal), onde os valores abaixo são alguns dos valores pertencentes a esta curva

Para, 10Vcc ----- 5MW

e 1Vcc ----- 5mW

O medidor de Período, segue em geral uma função do tipo hiperbólica e tem a sua escala graduada em segundos. No caso do reator IEA-R1 o medidor de período apresenta os seguintes valores, valores estes que são pontos de uma curva hiperbólica:

3s ----- 10V

∞ ----- $\approx 1V$

-30s ----- 0V

Saída para *Scaler*

Na saída para *Scaler*, são obtidos pulsos de 0 à 5 Vcc (nível TTL), pulsos estes obtidos na saída do amplificador, antes do medidor taxa de contagem, e que permite a conexão de um *scaler* ao contador externo, para acompanhar a taxa de crescimento do fluxo do reator.

5 - ALGORITMO

Para simular o comportamento real do sinal encontrado no canal de partida de um reator nuclear é necessário que se desenvolva um algoritmo que permita gerar uma evolução exponencial de um trem de pulso.

Uma das maneiras de resolver esse problema seria gerar uma evolução exponencial de um sinal analógico (por exemplo, por meio de um conversor D/A) e então aplicá-lo a um conversor tensão/frequência.

Este método apresenta algumas vantagens tais como a simplicidade do *software* requerido para a geração deste trem de pulso. Uma desvantagem, está na necessidade de se efetuar calibrações periódicas dos circuitos eletrônicos que fariam parte deste cartão.

Outra maneira, seria determinar para um trem de pulso com evolução exponencial, os intervalos de tempo entre pulsos. Assim poder-se-ia programar um contador para realizar essa evolução.

As vantagem deste processo é que seria um processo totalmente digital, não necessitando de calibrações ou ajustes. A desvantagem está na maior complexidade do *software* desenvolvido.

Em razão da vantagem já comentada, optou-se por este último método, que apresenta uma geração de um trem de pulso, com grande precisão.

Portando como o gerador deve aumentar a frequência de saída de forma exponencial e com um período predeterminado, embora tenhamos um *software* de maior complexidade, isto pode ser compensado com a utilização de rotinas bem definidas e de execução rápida, para que o microcomputador possa efetuar todas as tarefas de controle e programação da placa, em tempo real de tal modo não que ocorram atrasos significativos, o que inviabilizaria a implementação do projeto.

Foi necessário considerar a precisão na definição dos instantes em que os pulsos gerados são habilitados, pois como veremos posteriormente, num processo de discretização o instante em que cada pulso é gerado depende do instante da ocorrência do pulso anterior e dessa forma as imprecisões, mesmo pequenas, podem comprometer a confiabilidade, em virtude da distorção ampliada pelo seu efeito multiplicador.

A seguir, vamos apresentar uma descrição da estrutura do algoritmo, dos seus parâmetros principais, das equações, dos métodos utilizados para melhorar a sua precisão em baixas frequências, os problemas encontrados em altas frequências e uma abordagem da imprecisão existente no cálculo dos intervalos de tempo.

Considerando o valor inicial da frequência conhecida, a questão se resume em achar um método para se calcular o intervalo de tempo entre pulsos, para poder gerar um trem de pulsos de forma a obter-se uma curva exponencial de frequências de acordo com o período do reator.

Do ponto de vista prático são conhecidos os seguintes parâmetros:

- . A frequência inicial
- . O valor do período do reator desejado
- . A precisão desejada no cálculo do intervalo de tempo entre dois pulsos

A figura 5-1 apresenta uma figura onde se define os primeiros parâmetros deste algoritmo.

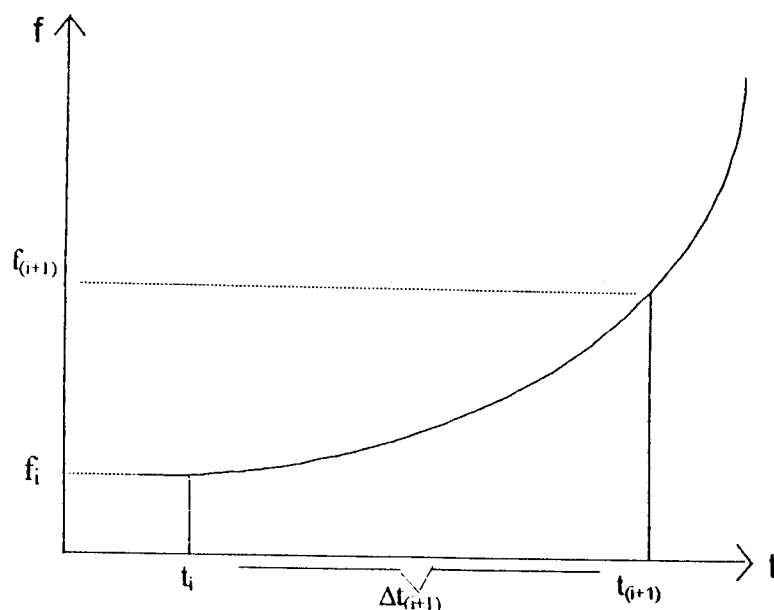


Figura 5-1 - A evolução exponencial

Seja uma evolução exponencial apresentada na figura 5-1, onde:

t_i o instante de ocorrência do pulso i .

t_{i+1} o instante de ocorrência do pulso $i+1$.

Tem-se o intervalo de tempo entre os dois pulsos representado por Δt_{i+1} ou seja:

$$\Delta t_{i+1} = t_{i+1} - t_i \quad (5-1)$$

Se a condição de um reator for tal que o mesmo apresenta um período T_r , a taxa de contagem do detector utilizado para monitorar o fluxo $f(t)$ varia de acordo com a seguinte equação:

$$f(t) = f_0 e^{(t/T_r)} \quad (5-2)$$

onde f_0 é a taxa de contagem (frequência) no instante inicial.

Em termos discretos, considerando os instantes t_i e t_{i+1} como os instantes de geração de dois pulsos consecutivos pode-se escrever a equação 5-2 como:

$$f(t_i) = f_0 e^{(t_i/T_r)} \quad (5-3)$$

e

$$f(t_{i+1}) = f_0 e^{((t_{i+1})/T_r)} \quad (5-4)$$

dividindo-se 5-3 por 5-4, resulta

$$(f(t_{i+1}))/f(t_i) = (e^{((t_{i+1})/T_r)})/(e^{(t_i/T_r)}) \quad (5-5)$$

ou seja:

$$f(t_{i+1}) = f(t_i) e^{((t_{i+1}) - t_i)/T_r} \quad (5-6)$$

logo:

$$f(t_{i+1}) = f(t_i) e^{(\Delta t_{i+1})/T_r} \quad (5-7)$$

Se

$$(\Delta t_{i+1})/T_r \ll 1 \quad (5-8)$$

a função exponencial pode ser aproximada por uma série de Taylor com apenas dois termos, ou seja:

$$\exp(\Delta t_{(i+1)}/Tr) = (1 + (\Delta t_{(i+1)})/Tr) \quad (5-9)$$

e neste caso:

$$f_{(i+1)} = f_i \cdot (1 + (\Delta t_{(i+1)})/Tr) \quad (5-10)$$

Associando-se os instantes t_i aos instantes de ocorrência dos pulsos a serem gerados e como o período de um trem de pulso é definido como sendo o intervalo entre dois pulsos consecutivos, o período do trem de pulso, no instante de ocorrência de um pulso, pode ser calculado como:

$$\Delta t_i = 1/f_i \quad (5-11)$$

No nosso caso, o período pode ser calculado tomando-se dois pulsos consecutivos da seguinte forma:

$$t_{(i+1)} - t_i = \Delta t_{i+1} \quad (5-12)$$

Considerando-se a aproximação 5-8 como a frequência é o inverso do período temos:

$$f_{(i+1)} = 1/(\Delta t_{(i+1)}) \quad (5-13)$$

Logo, voltando na equação 5-10:

$$1/(\Delta t_{(i+1)}) = f_i(1+(\Delta t_{(i+1)})/T_r) \quad (5-14)$$

A solução desta equação é uma equação do segundo grau do tipo $ax^2 + bx + c = 0$, logo, resolvendo esta equação obtém-se o valor de Δt_{i+1} .

Portanto, partindo de uma frequência inicial f_0 e um valor fixo de T_r , obtenho Δt_1 a partir da seguinte expressão:

$$1/\Delta t_1 = f_0.(1+(\Delta t_1)/T_r) \quad (5-15)$$

A seguir calcula-se o novo f_1 através da equação

$$f_1 = f_0 \exp((\Delta t_1)/T_r) \quad (5-16)$$

e assim, sucessivamente, calculando-se os novos valores de Δt_{i+1} e f_{i+1} .

Devemos observar que a equação 5-9 e 5-13 são válidas para valores de Δt_{i+1} pequenos quando comparados com T_r , ou seja, frequências “altas” de pulsos quando comparadas com as taxas de evolução da exponencial. Para as baixas frequências, a solução adotada foi dividir $\Delta t_{(i+1)}$ em k subintervalos iguais executando-se o cálculo iterativo k vezes, obtendo-se o valor $T_{(i+1)}$ que será o próximo pulso gerado.

$$1/(\Delta t_{(i+1)}) = kf_i(1+(\Delta t_{(i+1)})/T_r) \quad (5-17)$$

Já para altas frequências, pode ocorrer que o intervalo de tempo Δt_{i+1} seja tão pequeno que o conjunto *hardware-software* não consiga gerar novos pulsos em tempo real. Neste caso, a solução encontrada foi introduzir o parâmetro “ n ” que permite a geração de n pulsos numa frequência constante,

durante n intervalos de tempo, de forma que $n\Delta t_{i+1}$ seja o tempo suficiente para manter o conjunto *hardware-software* operando em tempo real.

Considerando $\Delta t_{\min}$ o intervalo mínimo para que o conjunto opere em tempo real, o valor de n é calculado como:

$$n = \text{int}(\Delta t_{\min}/\Delta t_{(i+1)}) + 1 \quad (5-18)$$

ou seja, $\Delta t_{\min}$ é o valor do intervalo de tempo a partir do qual “ n ” passa a ser maior que 1.

$$f_{(i+1)} = f_i \exp((n\Delta t_{i+1})/Tr) \quad (5-19)$$

Desde que $n\Delta t_{i+1}$ seja muito menor que Tr , a utilização da função exponencial na equação 5-19 permite a redução da imprecisão existente entre a exponencial teórica e a calculada, pois no cálculo de f_{i+1} se utilizou a expressão completa (equação 5-17) e não a expressão reduzida (equação 5-9).

Graficamente tem-se:

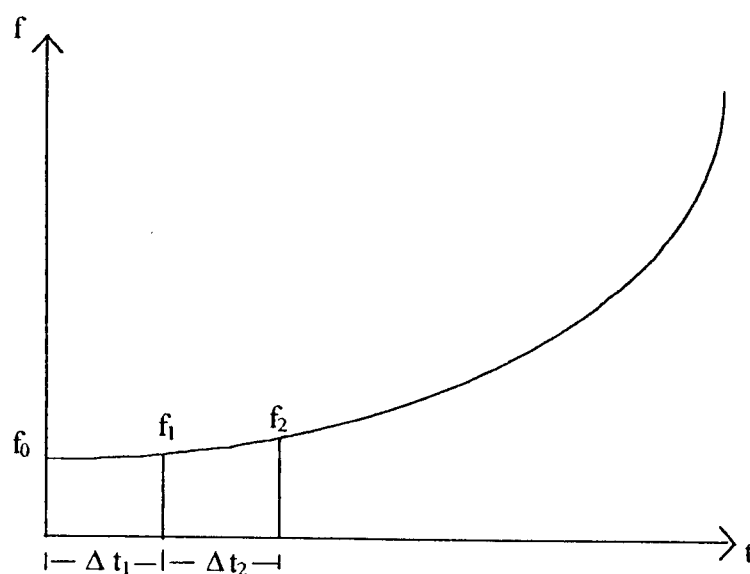


Figura 5-2 – disposição dos Δt

Comentários sobre a imprecisão existente no cálculo do Δt_i - Como para o cálculo do Δt_i se utilizou uma simplificação da função exponencial, os dois pontos calculados (t_i e t_{i+1}) foram ligados por uma semi-reta e não por uma curva exponencial, isto leva a uma imprecisão, pois para o cálculo exato do Δt_i seria necessário que se resolvesse a equação transcendental, e esta só possui solução numérica.

Uma das formas de se calcular a imprecisão do algoritmo, é através da expressão 5-7, rescrevendo temos:

$$\Delta t_{(i+1)}/Tr \ll 1$$

Para esta relação se permanecer sempre verdadeira é necessário para as baixas frequências se interpolar o valor de $\Delta t_{(i+1)}$, esta interpolação será detalhada nas paginas seguintes.

Logo voltando as equações 5-7 e 5-13 podemos escrever

$$1/(Tr \cdot f_{(i+1)}) \cong \text{imprecisão} \quad (5-20)$$

Como o valor da imprecisão pode ser prefixado (1% , 0,1% etc.) e o valor de Tr é fornecido, posso determinar o valor de $f_{(i+1)}$ com uma precisão estimada.

Como a frequência é definida como sendo o inverso do período, rescrevendo a equação temos:

$$f_i = 1/\Delta t_i \quad (5-21)$$

Ao se diminuir o intervalo de tempo entre os pulsos, tudo se passa, como se a frequência aumentasse (vide figura 5-3).

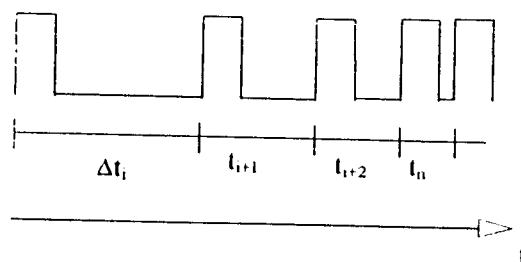


Figura 5-3 - Seqüência de pulsos em função do tempo simulando uma frequência variável.

Apresentamos a seguir uma explicação mais detalhada para os parâmetros “n” e “k”.

Para $n \geq 1$.

Ao se programar um “n” inteiro > 1 , o *software* modifica os demais parâmetros de forma a não apresentar grandes distorções na função a ser gerada.

Desta forma a figura 5-4 mostra que se n fosse igual a 1 o valor $t_{(i+1)}$ seria onde foi representado por t_{ii} , mas com o uso do parâmetro n e sendo este n maior que 1, este intervalo de tempo foi aumentado e se confirmou em $t_{(i+1)}$ como apresentado na figura, mantendo a progressão desejada, sem criar grandes distorções, mesmo com $n > 1$.

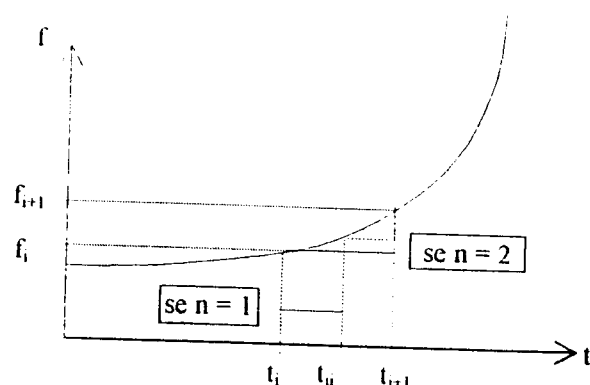


Figura 5-4 - Variação da frequência quando $n > 1$.

Quando o cálculo do algoritmo se torna insuficiente para este novo valor de “n”, o programa novamente atribui a “n” valor superior, igual ao anterior mais 1, repetindo as operações já descritas. O valor atribuído é o imediatamente superior e suficiente para permitir que se carregue o gerador e o contador com novos valores, sem ocorrência de grandes saltos em frequências de modo a não provocar grandes distorções em relação a uma curva exponencial, pois, caso contrário, os medidores podem indicar valores outros, que não os referentes ao teste que está sendo executado, apresentando erros, ao se analisar os dados obtidos.

Como se dispõe de um gerador capaz de fornecer mais de um pulso, em um dado intervalo de tempo, para se obter um comportamento semelhante a uma função exponencial, basta que se controle o tempo de operação desta frequência. Logo ajustando Δt para um intervalo de tempo adequado, e aumentando “f” e “n”, teremos um aumento no valor da função desejada, podendo-se gerar pulsos de alguns hertz até milhares de hertz.

A seguir será apresentado os exemplos para o caso onde $k > 1$.

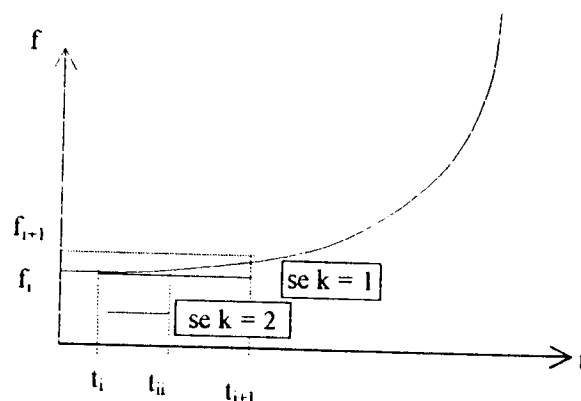


Figura 5-5 – comportamento da curva para $k > 1$

O parâmetro k possui a função de melhorar a precisão matemática nos valores iniciais das frequências, quando o valor de Δt , em função do algoritmo desenvolvido, tende a serem maiores, desta forma este parâmetro melhora a precisão do instante $t_{(i+1)}$ onde efetivamente ocorrerá o pulso seguinte.

O valor de k inicial vai sendo reduzido até o valor unitário, isto porque se este ficasse constante e com um valor elevado, por exemplo $k=16$, ter-se-ia um grande aumento no número de pontos calculados e sem necessidade, já que os desvios estariam abaixo do valor máximo especificado, isto é, o intervalo entre os pulsos já estaria muito pequeno.

6. REQUISITOS DE PROJETO DO CARTÃO DESENVOLVIDO

Para que um circuito eletrônico gere um sinal que possa ser utilizado na entrada de testes de um canal de partida de um reator nuclear, é necessário que o mesmo tenha um comportamento dinâmico, apesar de possuir características diferentes semelhante aos pulsos gerados pelo detector de radiação, ou seja, deve procurar reproduzir as variações que possam ocorrer dentro do núcleo.

Conforme explicado no capítulo 4, de uma forma geral, as variações de fluxo no interior do núcleo do reator apresentam um comportamento exponencial. Portanto, o circuito desenvolvido para que possa testar o canal de partida de um reator nuclear deve ser capaz de gerar pulsos com uma faixa de variação correspondente a faixa de variações do canal de partida e simulando uma função exponencialmente, partindo de qualquer valor acima de 1Hz (1Hz é considerada a taxa de contagem mínima em um canal de partida de um reator) e com entradas suficientes para receber os sinais vindos da mesa de controle, tais como sinais de pulso e sinais de corrente contínua, e depois salvá-los em disco.

As entradas e saídas do cartão desenvolvido deverá ser conectada à instrumentação da mesa de controle do reator IEA-R1 da seguinte forma. Desliga-se a alta tensão que alimenta o detector de radiação do canal de partida (Campbell) e na entrada de "teste" do pré-amplificador de pulsos, se

conecta a saída do gerador do cartão desenvolvido. E nas entradas do cartão desenvolvido se conectar as saídas do medidor de taxa de contagem, do medidor de período e da saída para contador (“*scaler*”), conforme ilustrado na figura 6-1.

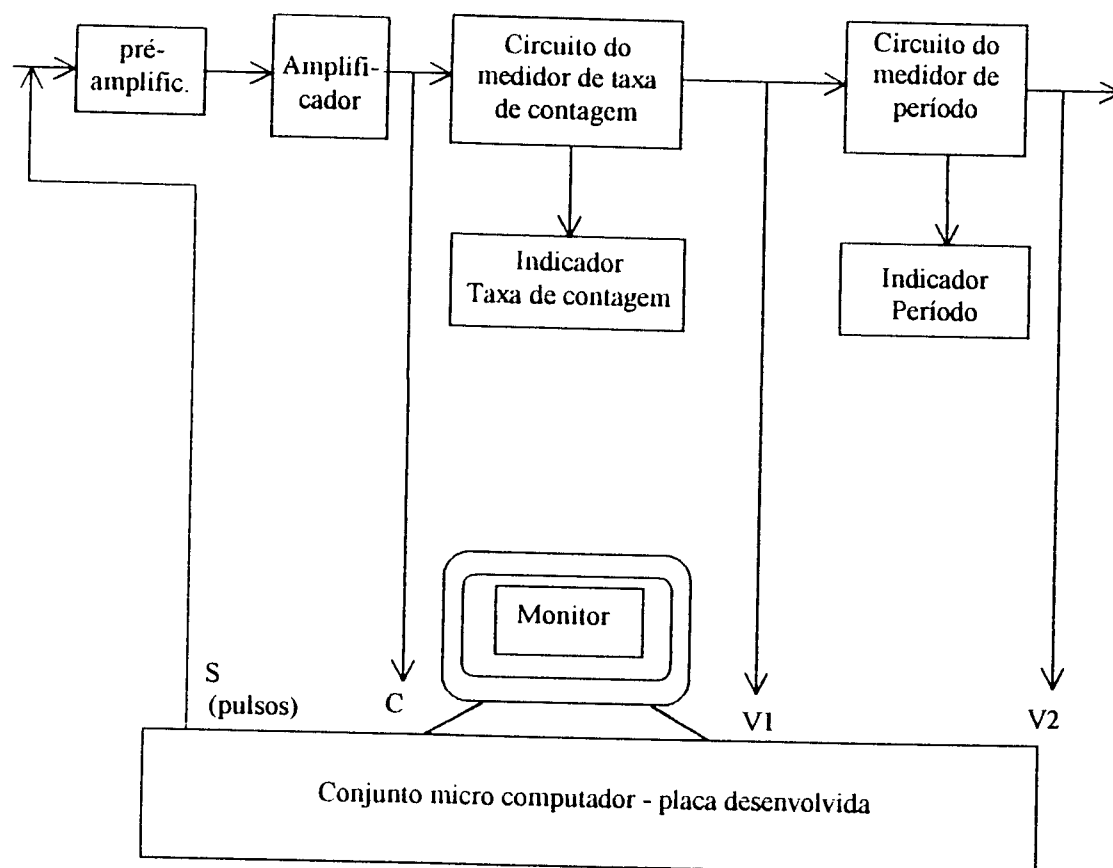


Figura 6-1 Diagrama de blocos mostrando as ligações das entradas e saídas do cartão desenvolvido às entradas e saídas da mesa de controle

Onde:

S é a saída de pulsos para o pré-amplificador

C é a saída de pulsos para o contador (*scaler*).

V1 é a tensão de saída do circuito medidor da taxa de contagem.

V2 é a tensão de saída do circuito medidor de período.

Tendo em vista que o circuito a ser desenvolvido deve ser do tipo digital, estabelecemos para ele as especificações de contorno listadas a seguir:

- possuir algoritmo com capacidade para mudar a taxa de geração de pulsos de forma exponencial, partindo de qualquer valor acima de 1Hz e tenha como limite superior o valor de 300kHz, faixa considerada operacional para um canal de partida de um reator.
- capacidade de simular uma variação de período de um reator, ou seja, começar um transiente seguindo uma curva exponencial e logo em seguida mudar para outra curva exponencial (mais rápida).
- capacidade de gerar pulsos com largura de pulso de 500ns ou 200ns (variável internamente por um "jumper") e altura de pulso ajustável de 0 a 3 volts.
- saída(s), isolada(s) eletricamente, para cabo coaxial de 50 Ω .
- Possuir 3 entradas, sendo duas entradas de 0 à 10Vcc e outra com pulsos de amplitude 0 - 5 Vcc (com níveis de tensão para circuitos TTL e largura de pulsos recomendada de 500ns). Todas elas eletricamente isoladas.

Esta isolamento é conveniente por pelo menos duas razões: a) evitar que um eventual curto circuito no microcomputador ou no cartão desenvolvido se propague à mesa de controle b) eliminar ou diminuir sensivelmente a tensão de modo comum, eventualmente existente, entre os dois equipamentos.

O *software* deve permitir a entrada dos valores que serão utilizados diretamente pelo algoritmo para simulação da curva exponencial. Estes valores são: período desejado (T_r), precisão dos intervalos de tempo calculados (1%, 0,1%, até 0,02%) e a frequência inicial. Os dados dos parâmetros coletados serão salvos em arquivos na forma binária ou ASCII.

7 – CARTÃO DESENVOLVIDO

7-1 – Características do cartão desenvolvido

A construção de um cartão utilizando-se circuitos digitais, que pode ser conectado em um “slot” de um micro computador da linha IBM – PC apresenta inúmeras vantagens tais como, a facilidade de transporte, pois pode ser levado em uma pequena caixa e conectado a qualquer máquina compatível, a utilização de micro computadores mais rápidos quando disponíveis, a utilização de vários software compatíveis para análise dos dados, tudo em uma mesma plataforma, além da possibilidade de se conectar em rede e ler os arquivos obtidos remotamente, etc.

Como para o desenvolvimento deste cartão optou-se pela tecnologia digital, necessitando para seu funcionamento, somente de um software do tipo executável, facilitando desta forma o seu transporte, e mantendo sempre as suas características de projeto permitindo sempre, uma boa avaliação do canal de partida.

O *hardware* desenvolvido gera um sinal de comportamento “semelhante” ao que é fornecido pelo detector de radiação e deve ser aplicado à entrada de teste do pré-amplificador. Os sinais que chegam a mesa de controle, após ter passado pelos seus circuitos eletrônicos, são levados aos indicadores nela existentes e disponibilizados em saídas apropriadas para serem utilizados externamente por sistemas de aquisição de dados, voltímetros

de corrente contínua, etc. Usaremos estas saídas, para a aquisição dos dados processados pela mesa, armazenando-os em arquivo para análise posterior. (vide figura 6-1).

Os parâmetros que poderão ser coletados são: (a) os pulsos que são aplicados à entrada do medidor taxa de contagem, (b) a taxa de contagem (que é proporcional a potência do reator) e (c) a taxa de variação desta potência (período) que são utilizados pela mesa de controle para fornecer os dados ao operador ao registrador de eventos da mesa de controle.

Com relação ao software para que este gere um sinal com comportamento semelhante ao de um detector de nêutrons, foi utilizado o algoritmo já descrito que gera uma seqüência de pulsos que tem um comportamento semelhante a uma função exponencial, partindo de qualquer valor acima de 1Hz e tenha como limite superior o valor 300kHz, pois a faixa operação de um canal de partida, normalmente é de até 300kHz.

As principais características técnicas do cartão desenvolvido são:

Com relação ao *Hardware*:

Opera em qualquer microcomputador do tipo PC, com microprocessador 80486, com clock de 66MHz e 16M de memória RAM, ou em microprocessadores mais rápidos porém com 16M de memória RAM no mínimo.

Cartão instalável em "slot".

Geração de pulsos através de divisores de frequências (contadores).

Circuito do gerador de pulso que não necessita de calibração.

Contador interno de pulsos de 1 até 256 pulsos.

Seleção de endereços através de chaves tipo *dip-switch*.

Saídas para interrupções de *hardware* através dos IRQs nº 3, 4, 5, 9, 10, 14 ou 15.

Interrupção por tempo ou por contagem de pulsos.

Cronômetro interno de 16 bits conectado à saída de interrupções através de um *flip flop* com intervalos de tempos de milisegundos até horas.

Frequência de operação do gerador de pulso de 1 à 300kHz.

Pulsos de largura ajustável por *jump* interno de 500ns ou 200ns.

Saída isolada com tensão de isolamento de 2,5kVac 3kVcc, rejeição de modo comum de 10000V/ μ s e fusível de ¼A.

Tensão de saída ajustável de 0 à 3Vcc ou o seu complementar, para cabo coaxial de 50 Ω .

Duas entradas 0 à 10Vcc isoladas, com tensão de isolamento de 2,5kVac 3kVcc e rejeição de modo comum de 10000V/ μ s utilizado um

conversor tensão/frequência com fundo de escala de 100kHz e não linearidade de $\pm 0,03\%$.

Entrada de pulsos para níveis TTL isolada, com tensão de isolamento de 2,5kVac 3kVcc e rejeição de modo comum de 10000V/ μ s.

Fontes de alimentação isoladas e independentes com tensão de isolamento de 1,5kVcc.

Sendo um cartão dedicado, já possui implementado no mesmo os recursos necessários a análise de um canal de pulso de reator tanto na geração dos sinais como na obtenção dos sinais processados pela mesa de controle, dispensando o uso de qualquer outro equipamento externo, além de ser um dispositivo que poderá ajudar nos reparos do canal de partida caso este apresente problemas e seja necessário calibrá-lo novamente.

Pode-se expandi-lo com a colocação de novos circuitos pois o cartão permite expansões se necessárias, com a incorporação de novos circuitos ou novas funções de *hardware*. Há disponibilidade de endereços e de controles para os novos circuitos.

Com relação ao *software*:

O *Software* desenvolvido é composto de um conjunto que possui três softwares distintos para geração de uma função exponencial de período constante, e que serão descritos a seguir:

O primeiro *software* através das informações dos valores de tempo e frequência fornecidas pelo operador construirá uma tabela, utilizando

o algoritmo desenvolvido. Estes valores serão utilizados pelo segundo software para programar o conjunto de circuitos (gerador e os temporizadores/contadores). Esta tabela será salva em disco na forma binária.

Estes valores são:

Período da função exponencial - T_r

Precisão desejada no intervalo de tempo entre dois pulsos - (1%, 0,1% , ... 0,02%)

Frequência inicial - f_0

Este cartão pode ter ainda sua faixa de operação variável de acordo com a necessidade do operador, o que permite-se avaliar determinado trecho ou toda a faixa de funcionamento do canal de pulso do reator.

O segundo *software* do conjunto efetua o controle da placa e inicia a operação da placa lendo os dados salvos em binário pelo primeiro *software*, efetua a programação dos contadores, habilita as interrupções, aciona o gerador e aguarda as interrupções. Após a interrupção, identificar quem a solicitou, se foi o gerador, carregar o gerador com os novos valores de frequência e/ou tempo, se foi o temporizador dos contadores, ler os valores deste contadores, salvando-os em tabela. A seguir, recarrega os contadores e iniciar novamente o ciclo descrito. Os sinais adquiridos da mesas de controle, serão salvos em disco, em arquivo sob nome diferente do nome do arquivo do primeiro *software*.

A possibilidade de salvar os dados em disco permite a realização de uma análise detalhada dos resultados obtidos com a utilização dos recursos dos *software* mais recentes disponíveis e ainda a recuperação dos dados originais em qualquer instante para novas avaliações.

Um terceiro *software* converte os dados salvos em formato binário em código ASCII com a extensão .TXT.

Desta forma os dados salvos, obtidos na saída da mesa de controle, podem ser recuperados e transpostos para uma planilha eletrônica, para comparações e análises ou utilizados em editores de textos para confecções de relatórios.

7-2 - Diagrama de blocos do *hardware*

A figura 7-1 apresenta um diagrama de blocos do cartão desenvolvido.

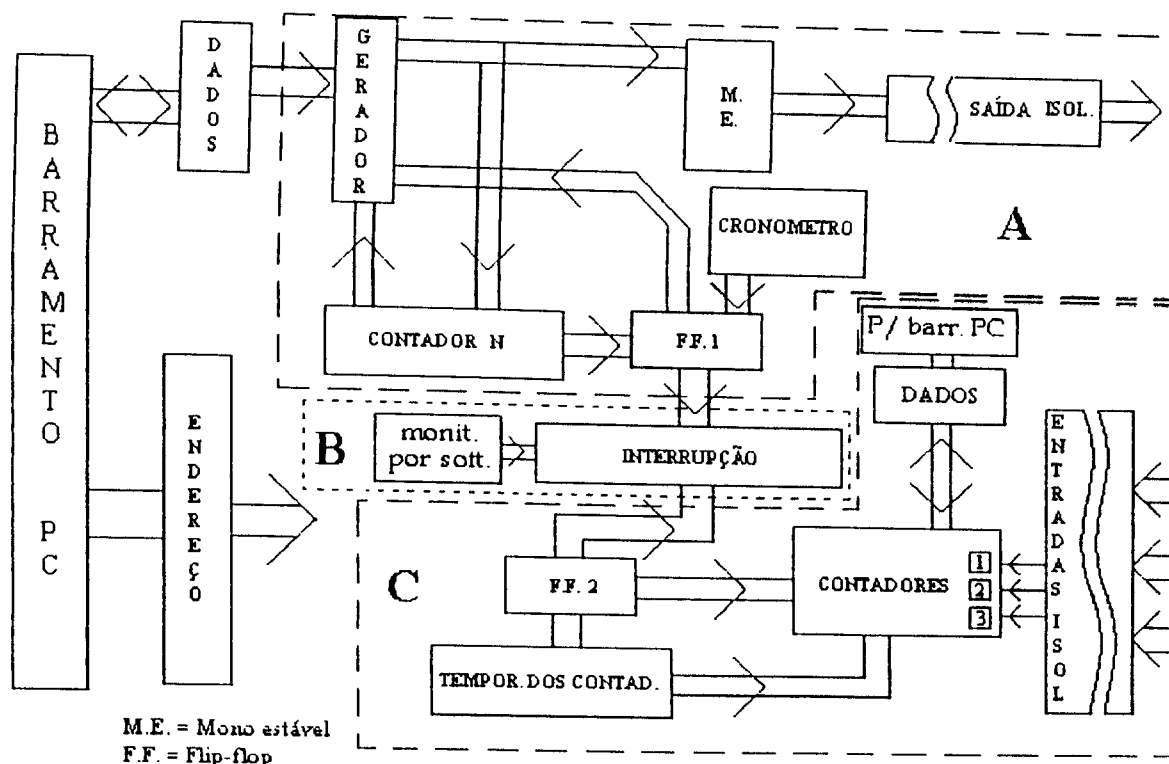


Figura 7-1- Diagrama de blocos do cartão desenvolvido

Onde:

A é o digrama de blocos do sistema gerador de pulso.

B é o digrama de blocos comum ao gerador de pulso e ao sistema de aquisição de dados.

C é o digrama de blocos do sistema de aquisição de dados.

A seguir é apresentado um diagrama de blocos do sistema de geração de pulso figura 7-2.

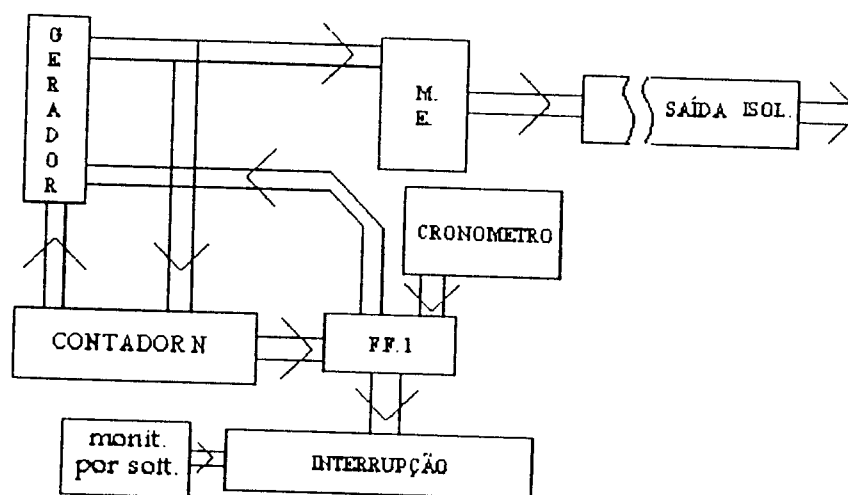


Figura 7-2 - Bloco do sistema gerador de pulso

Este bloco é o responsável pela geração dos pulsos que serão levados até a entrada do pré-amplificador do canal de partida do reator.

A seguir faremos uma breve descrição das partes que compõem este bloco.

- GERADOR: consiste de um oscilador a cristal de 10 MHz conectado à entrada de um contador digital duplo de 16 bits cada um, que irá dividir a frequência de entrada por um valor determinado pelo algoritmo, permitindo-se obter a frequência desejada.

A sua saída é conectada à dois circuitos, um contador de pulsos (CONTADOR N) e a um circuito mono estável (M.E.).

- CONTADOR N: O contador de pulsos n, possui atuação direta no circuito de saída do bloco de nome GERADOR. Este contador n conta pulsos de 1 até um valor estabelecido pelo *software*, valor este, calculado através do algoritmo envolvido. Quando a contagem atinge o número n programado é interrompido o funcionamento do gerador e informado o microcomputador. A seguir o *software* programa nova frequência e novo número de pulsos a ser contado, carrega o primeiro no gerador e o segundo no contador e os libera para novo ciclo. E assim, sucessivamente, até atingir a frequência desejada para a simulação e respectiva avaliação.

- O circuito mono estável (M.E.) formata um pulso, mantendo sua amplitude e largura constante o qual após ser amplificado e isolado eletricamente (bloco "saída isolada") é aplicado á entrada do pré-amplificador do canal de partida do reator.

CRONÔMETRO: Utilizado somente durante os testes de *hardware*, para se medir o intervalo de tempo programado, permitindo que se confira se a frequência está no valor desejado.

A seguir é apresentado um diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.

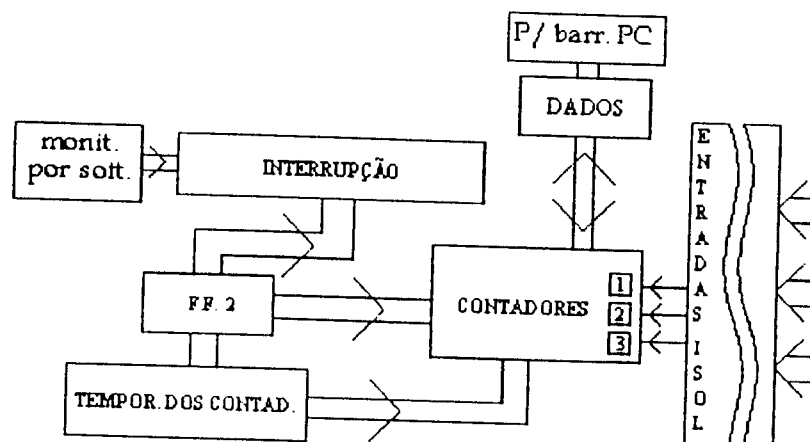


Figura 7-3 - Bloco do sistema de aquisição de dados

Este bloco é o responsável pela aquisição dos dados vindos da mesa de controle.

A seguir faremos uma breve descrição das partes que compõem este bloco.

ENTRADAS ISOL: Composto de 3 entradas: 2 para sinais de 0 à 10 Vcc e outra para pulsos. As duas entradas para sinais de 0 à 10 Vcc são constituídas por um amplificador inversor e um conversor tensão frequência (V/F) de 0 à 100 kHz, com um fator de conversão de 10 kHz/Volt. A seguir este sinal é levado a um foto acoplador que realiza a isolamento elétrica antes do sinal ser aplicado à entrada do contador. A entrada de pulsos é constituída por um circuito casador de impedância para cabo coaxial de 50 ohms, amplitude de pulsos de 5V, largura de pulso de 50ns, eletricamente isolada através de um foto acoplador de cuja saída é levada à entrada do circuito contador.

CONTADORES: O contador é constituído por três contadores independentes de 16 bits cada um, com uma indicação de *overflow* em cada

um dos contadores. Quando ocorre uma interrupção, os dados armazenados no contador são lidos pelo micro e o *software* utilizando a relação (contagens/tempo) realiza a conversão em taxa de contagem e os armazena em tabelas e posteriormente em arquivos. Os contadores são novamente carregados com o valor hexadecimal FFFF e quando ocorre um pulso, este decrementa o valor armazenado no contador. Após cada leitura é novamente recarregado o contador com o valor FFFF

Caso ocorra um *overflow* nas contagens, (contador chegando em zero) uma mensagem é enviada imediatamente ao operador através do monitor do microcomputador solicitando que se reinicie as medidas ou se desconsidere o valor obtido.

TEMPORIZADOR DOS CONTADORES: Este temporizador mede o tempo programado e a seu término, interrompe as contagens dos três contadores permitindo se obter a relação contagens/tempo já mencionado, obtendo portanto a taxa de contagem. Este fato é informado ao microcomputador através do sinal de saída do circuito *flip flop* FF2, para que este efetue a leitura dos dados dos três contadores.

Estes blocos descritos a seguir possuem um funcionamento semelhante e serão apresentados a seguir.

"*Flip flops*, FF1 e FF2": São constituídos por circuitos digitais que quando acionados permanecem em um estado lógico fixo até que seja retornado à condição inicial (reset). São utilizados para acionar os circuitos que solicitam a interrupção do microcomputador e também interromper o funcionamento do gerador, que é executado pelo FF1 ou interromper as contagens, que é executado pelo FF2.

INTERRUPÇÃO: O bloco denominado interrupção é constituído de sinais que são levados ao barramento do microcomputador para realizar uma solicitação de interrupção (*Interrupt Request Line* – IRQs), que irá gerar uma interrupção nas suas outras atividades e executar uma rotina desejada. Este mesmo bloco permite também que se faça uma monitoração contínua, por uma rotina existente no *software* desenvolvido para identificar o momento em que ocorre a solicitação de interrupção.

7-3 - Funcionamento do cartão

Após a descrição dos blocos principais faremos a seguir uma descrição do funcionamento dos blocos existentes na figura 7-1.

O sinal de saída do cartão é gerado por um conjunto de circuitos que operaram o sistema gerador de pulso, vide figura 7-2.

Após a frequência do oscilador a cristal de 10 MHz ter sido dividida pelo circuito contador, o bloco cujo nome é GERADOR é devidamente habilitado pelo contador *n*, e obtida a frequência desejada. Esta passa por um foto-acoplador que efetua a isolação elétrica dos sinais e em seguida por um circuito mono estável que formata a largura de pulso em dois valores 500ns ou 200ns selecionáveis por *jump* existente na placa desenvolvida. Em seguida, um amplificador ajustável estabelece a tensão de saída, num intervalo de 0 à 3V. Esta frequência existirá até que o contador *n* termine as contagens e acione o *flip flop* FF1. Este solicitará ao micro computador interrupção das outras atividades para reprogramar o bloco gerador.

A seguir uma nova frequência é programada no gerador e o ciclo anterior se repete.

Como os pulsos podem ser habilitados em intervalos de tempo predeterminados, se desejamos gerar uma função exponencial, estes intervalos devem ser cada vez menores.

Após o sinal ser gerado e enviado para o pré amplificador do reator, o bloco do sistema de aquisição de dados é acionado (vide figura 7-3) e as 2 (duas) entradas de sinais de 0 à 10 Vcc passam a receber os sinais do medidor taxa de contagem e do medidor de período, convertendo-os em pulsos com um fator de conversão de 10 kHz/V. Estes sinais são eletricamente isolados e levados aos contadores digitais. A entrada de sinais para pulso, vindo da saída para contador (*scaler*), também é eletricamente isolada e levada diretamente aos contadores digitais (CONTADOR N).

O contador conta até que o bloco "Temporizador Dos Contadores" atue sob o FF2 interrompendo a operação dos três contadores independentes, solicitando uma interrupção ao microcomputador para que este efetue a leitura dos dados.

Esta solicitação pode ser atendida pelas linhas de interrupção já mencionadas (IRQs) ou pelo microcomputador, ao monitorar o estado lógico apresentado pelo circuito que solicita as interrupções dos IRQs.

8. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Nesta fase teve início o programa experimental que tem por objetivo, testar o cartão desenvolvido. Foram desenvolvidos testes para serem feitos inicialmente em bancada no laboratório e posteriormente no campo onde foi conectado ao reator IEA-R1m.

O programa experimental pode ser dividido em três experimentos distintos.

. Numa primeira fase se verificou o funcionamento dos blocos do cartão e quando necessário se desenvolveu *softwares* dedicados para teste destes bloco, apurando desta forma que o mesmo estava em condições de passar a segunda fase: a da integração do *hardware* com o *software* definitivo.

. A segunda fase começou com testes separados de *hardware* e *software* e terminou com testes unificados, qualificando o cartão de forma a permitir a sua utilização em um reator nuclear, para a verificação do seu canal de partida (pulso). Nesta fase os principais parâmetros do cartão já estavam bem conhecidos para que ao se realizar os experimentos no reator, os resultados obtidos não sofressem grande influência destes parâmetros, vindo a prejudicar os resultados obtidos.

. Na terceira fase do programa experimental, o cartão foi utilizado para testes no canal de partida no reator IEA-R1, onde ambos foram simultaneamente avaliados.

Desta forma faremos a seguir uma descrição mais detalhada destes testes, apresentando os resultados obtidos.

8-1 - Primeira fase de testes

Neste primeira fase acoplamos os equipamentos como no arranjo indicado na figura 8-1, objetivando testar o *hardware*. Para tal, nas duas entradas de tensão existente, foi conectada uma fonte de corrente contínua e um multímetro para monitorar o valor da tensão ajustada a entrada de tensão do cartão desenvolvido. Foram efetuados os testes para conhecer o comportamento do conversor V/F usando para tal *software* especialmente desenvolvido para o teste, com a leitura da frequência obtida na tela do monitor do micro computador.

Na saída de pulsos da placa desenvolvida, foi conectado um osciloscópio digital e um freqüencímetro para se verificar qual a frequência obtida na saída de pulsos da placa.

Na entrada de pulso, foi conectado um gerador de pulso, onde se aplicava uma frequência conhecida e se verificava se esta era lida pelos circuitos e apresentada na tela do micro computador.

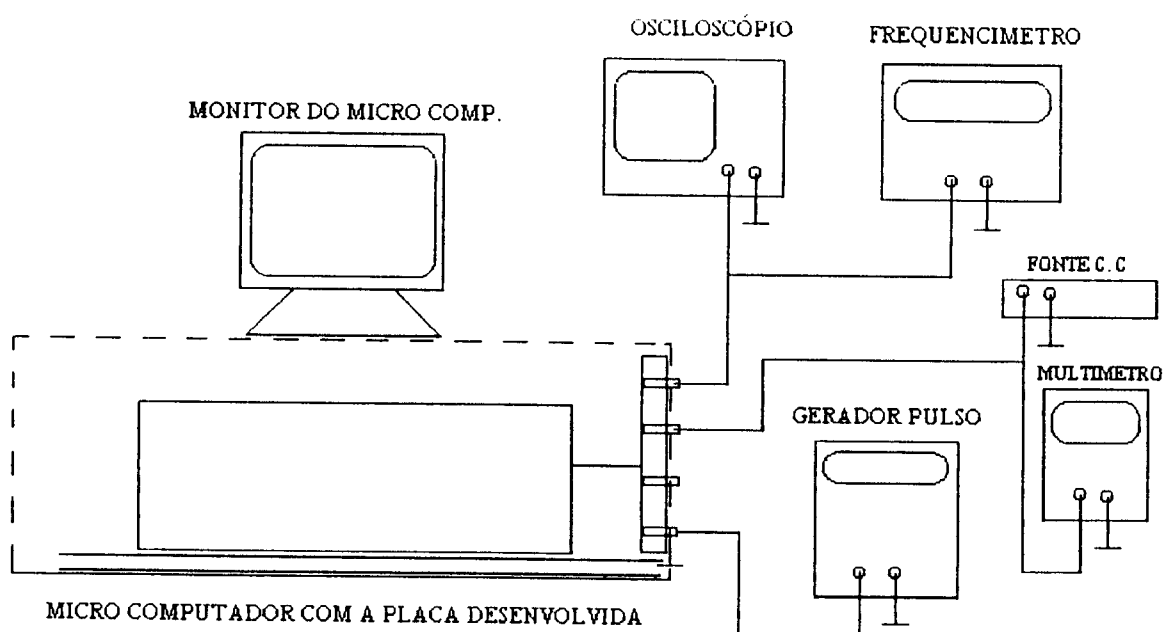


Figura 8-1 – Arranjo para a realização dos experimentos

Para se testar os vários blocos que compõem o cartão, utilizou-se o arranjo da figura 8-1.

O primeiro bloco a ser testado foi o do sistema gerador de pulsos, mostrado na figura 8-2.

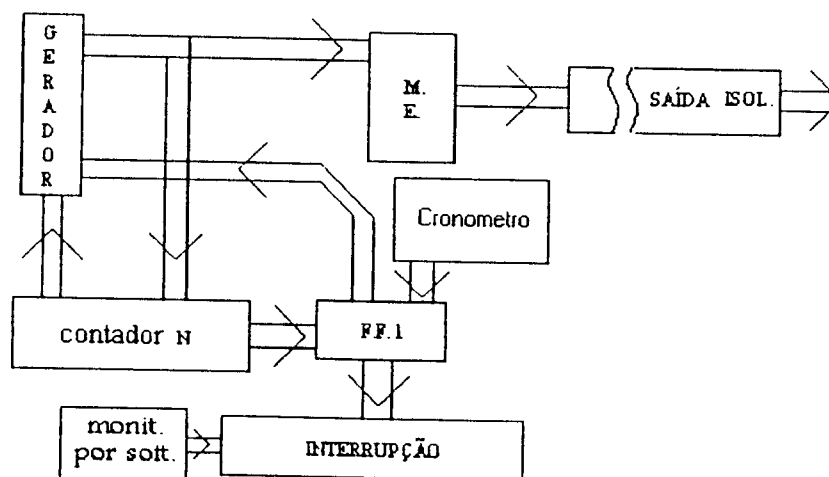


Figura 8-2 - Blocos do sistema gerador de pulsos

Este circuito possui na sua entrada um oscilador a cristal oscilando em uma frequência de 10 MHz.

Para a execução deste teste, programava-se uma determinada frequência que deveria ser fornecida pelo gerador e se conectava na sua saída um freqüencímetro digital. A frequência medida foi comparada com a frequência teórica e calculou-se o desvio obtido, através da relação $\text{frequência teórica} = \text{frequência inicial} / \text{contagens}$.

Por exemplo: Se a frequência inicial for igual a 10MHz e as contagens iguais a 10 tem-se uma frequência de saída de 1MHz. Os resultados obtidos estão indicados na tabela 8-1.

Pelos resultados observa-se que o desvio, neste caso é desprezível, ou seja, o cartão permite a geração de frequências com grande precisão.

Tabela 8-1 Frequências gerada na saída do bloco gerador de pulsos

Frequência teórica calculada (Hz)	Frequência medida (Hz)	Erro (%)
2.498.494,0	2.498.492,0	0,00
1.249.247,0	1.249.245,5	0,00
331.132,5	331.132,2	0,00
19.596,0	19.596,0	0,00
2.169,8	2.169,8	0,00
135,6	135,6	0,00
10,17	10,17	0,00
1,07	1,07	0,00
0,20	0,20	0,00

O segundo bloco a se testado foi as entradas do bloco sistema de aquisição de dados do cartão desenvolvido, mostrado na figura 8-3.

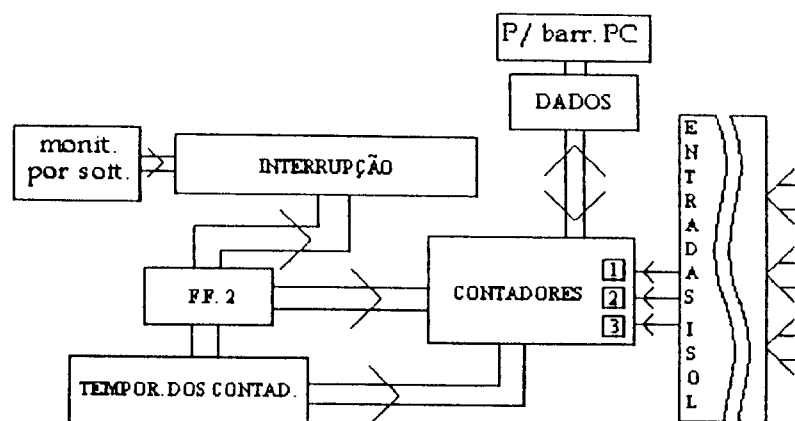


Figura 8-3 - Blocos do sistema de aquisição de dados

O objetivo dos testes realizados a seguir é verificar se o sistema de aquisição de dados está operando adequadamente. Para tal foi aplicada uma frequência conhecida na entrada de pulso e verificou-se se esta era apresentada na tela do micro computador. Nos testes da entrada de tensão, se aplicou uma tensão conhecida e como também era conhecida a relação tensão/frequência (V/F), foi possível verificar se o valor apresentado na tela do micro computador estava correta.

Uma das primeiras entradas testadas foi a entrada de pulso. Desta forma forneceu-se uma frequência conhecida na entrada de pulso e se verificou se a mesma frequência aparecia no monitor do micro computador e ao mesmo tempo se verificou ao se alterar o tempo de contagem se o mesmo estaria pouco sensível a estas variações.

Para teste desta entrada, foi injetado através de um gerador de função/pulsos com frequências de 1Hz até 1MHz.

Os valores obtidos, eram lidos no monitor do micro computador.

Os tempos de contagem, foram medidos diretamente pelo osciloscópio digital, e a taxa de contagem, obtida através do calculo (contagens/tempo). Os resultados são mostrados na tabela 8-2.

Tabela 8-2 Teste da entrada para pulsos

Frequência de entrada (Hz)	Contagem lida no monitor do PC (contagens)	Tempo de contagem dos pulsos (s)	Taxa de contagem (lido no monitor/tempo) (Hz)	Erro (%)
1	5	5,18	0,97	3,42
10	52	5,18	10,04	0,44
100	519	5,18	100,2	0,25
100	99	0,98	100,7	-0,71
1.000	984	0,98	1.000,0	-0,10
10.000	9.836	0,98	1.0005,9	-0,60
65.000	63.935	0,98	65.039,4	-0,06
65.000	34.099	0,52	65.038,4	-0,06
100.000	52.460	0,52	100.059,1	-0,06
300.000	12.295	0,041	300.170,9	-0,06
900.000	36.884	0,041	900.488,3	-0,05
1.000.000	40.983	0,041	1.000.561,5	-0,06

Observa-se que o maior erro ocorreu para a frequência de 1 Hz, e que isto ocorreu em função do intervalo de tempo utilizado ser baixo para se obter uma boa precisão nesta frequência. Isto é, ao se reduzir o intervalo de tempo também se reduziu o número de pulsos coletados, diminuindo a precisão dos valores calculados. Para os demais casos os valores estão bons.

Nota-se que o tempo de contagem de pulso foi alterado para quatro valores diferentes, 5,18s, 0,98s, 0,52s e 0,041s e os resultados foram satisfatórios.

Ainda no bloco de entradas, foi verificado o funcionamento do temporizador dos contadores, que controla o tempo de aquisição dos dados pelos contadores, pois sua precisão está associada à precisão dos dados obtidos.

A tabela 8-3 apresenta os resultados obtidos após mudar os tempos aplicados ao temporizador (vide coluna tempo de contagem pulsos). As contagens estão indicadas na coluna contagens acumuladas, que foram apresentadas no monitor do micro computador. A taxa de contagem é obtida através do cálculo (contagens/tempo). Neste teste, a frequência de entrada foi mantida constante e variou-se o tempo. Os resultados obtidos mostram que o máximo desvio medido foi de 0,05371%.

Tabela 8-3 Variação do tempo de contagem dos pulsos em relação a uma frequência de entrada fixa

Frequência de entrada em (Hz)	Contagens Acumulada (lidas no monitor do PC)	Tempo de contagem pulsos (s)	Taxa de contagem (Hz)	Desvio (%)
500.000	20.491	0,04096	500.268,6	0,05
500.000	4.097	0,00819	500.122,1	0,02
500.000	255	0,00051	500.000,0	0
500.000	15	0,00030	500.000,0	0
500.000	8	0,00016	500.000,0	0

Finalmente se avaliou as duas entrada de tensão entrada 1 e entrada 2.

Estes dois testes serão descritos juntos pois tratam-se de dois canais iguais, onde se adotou o mesmo procedimento de testes.

As entradas de tensão são em número de duas e serão chamadas de entrada de tensão1 e entrada de tensão2. Como já descrito anteriormente, recebe um sinal de 0 à 10Vcc e realiza a conversão desta tensão de entrada, para uma frequência proporcional à esta, através de um conversor V/F, com um fator de conversão de 10kHz/volt.

A frequência obtida após este conversor é aplicada a entrada dos contadores, que ao iniciarem as contagens, contam até serem interrompidos pelo temporizador. A seguir, são lidas as contagens efetuadas e como o tempo é conhecido, obtêm-se o valor da frequência através do cálculo (contagens/tempo) que é efetuado pelo *software* desenvolvido.

Desta forma se aplicou uma tensão conhecida na entrada de tensão 1, e se monitorou com um freqüencímetro, a frequência na saída do conversor tensão frequência, o valor apresentado no monitor do micro computador e com o auxilio de um osciloscópio digital, se monitorou o tempo de aquisição. O *software* realizou o cálculo entre o valor lido no monitor pelo tempo de aquisição apresentado na coluna freq. calc. valor lido monitor/ tempo de aquisição.

Os resultados são apresentados na tabela 8-4.

Avaliação da entrada de tensão 1

Tabela 8-4 Teste da entrada de tensão 1

Tensão entrada (V)	Frequência na saída do conversor tensão/frequência (Hz)	Valor lido no monitor (Hz)	Tempo de aquisição (s)	Freq. calc. valor lido monit./tempo de aquisição (Hz)	Desvio (%)
0,01	98,5	96	0,98	97,7	0,85
0,03	248,1	244	0,98	248,2	-0,05
0,1	996,6	980	0,98	996,9	-0,03
0,5	4.992,9	4.911	0,98	4.995,8	-0,06
1	9.989,3	9.826	0,98	9.995,7	-0,06
3	29.983,6	29.492	0,98	30.001,4	-0,06
5	49.981,0	49.160	0,98	50.009,1	-0,06
6	59.986,8	59.005	0,98	60.024,2	-0,06
6	59.986,0	15.734	0,26	60.021,4	-0,06
9	90.004,0	23.608	0,26	90.058,7	-0,06
10	100.016,3	26.234	0,26	100.076,3	-0,06

Pelos resultados obtidos nota-se que o maior desvio obtido foi de 0,85%.

Avaliação da entrada de tensão 2.

A tabela 8-5 apresenta os resultados obtidos e possui as mesmas características da tabela 8-4 já comentada.

Tabela 8-5 Teste da entrada de tensão 2

Tensão entrada (V)	Frequência na saída do conversor tensão/frequência (Hz)	Valor lido monitor (Hz)	Tempo de aquisição (s)	Freq. calc. valor lido monit./tempo de aquisição (Hz)	Desvio (%)
0,01	93,6	92	0,98	93,6	0,01
0,025	243,1	239	0,98	243,1	-0,01
0,1	992,9	977	0,98	993,9	-0,10
0,5	4.991,3	4.909	0,98	4.993,8	-0,05
1	9.992,5	9.829	0,98	9.998,8	-0,06
3	30.002,2	29.511	0,98	30.020,8	-0,06
5	50.016,0	49.200	0,98	50.049,8	-0,07
6	60.022,0	59.043	0,98	60.062,9	-0,07
6	60.022,0	15.743	0,26	60.055,7	-0,06
9	90.060,0	23.622	0,26	90.112,2	-0,06
10	100.074,0	26.250	0,26	100.137,3	-0,06

Pelos resultados obtidos nota-se que o maior desvio obtido foi de 0,89%.

8-2 - Segunda fase de testes

Nesta fase teve início a integração dos conjuntos de *software*.

O primeiro teste da segunda fase, foi o teste do primeiro conjunto de *software* desenvolvido que utilizando o algoritmo desenvolvido, gerou os dados que serão salvos em disco. Depois, foi feito o teste do segundo conjunto de *software*, que lê os dados salvos em disco pelo *software* anterior, efetua o controle do cartão desenvolvido e salva os dados adquiridos em disco no formato binário.

A seguir foi feito o teste do conjunto de *software* que converte os dados salvos em binário e os transforma em caracteres ASCII salvando-os sob a extensão .TXT (formato texto).

Uma vez concluído os testes do conjunto de *softwares*, responsável pela formatação dos arquivos e controle do cartão, iniciou-se os testes de laboratório, do cartão desenvolvido. Um dos testes realizados, foi a verificação do desvio de frequência apresentado entre a frequência teórica e a frequência medida. Assim sendo, o computador foi programado para gerar uma função exponencial de período pré definido (neste caso de 30s) e se estabeleceu um tempo pré determinado para o gerador ficar gerando esta função exponencial.

Este tempo era controlado pelo cronômetro interno existente no cartão. Após o termino deste intervalo o gerador permanecia operando na última frequência programada. Esta frequência foi medida e seus valores

dispostos sob a forma de tabela permitindo desta forma a sua comparação com a frequência calculada teoricamente.

Os resultados são apresentados e comentados a seguir, observando-se que em cada tabela o período T_r é fixo. Os intervalos entre os pontos foram escolhidos tomando-se por base valores de frequência, onde se procurou utilizar aproximadamente o dobro do valor da frequência anterior, até a frequência de 100KHz. A partir desta frequência procurou-se estabelecer um intervalo de 50KHz, até a frequência de 300KHz.

Os teste se iniciaram com a geração de um função de característica exponencial de período 30,00s. A tabela 8-6 e a figura 8-4 apresentam os resultados obtidos.

Tabela 8-6 Exponencial gerada para um período de 30s e uma precisão de 0,1%

Tempo (s)	freq. teor. (Hz)	freq. med. (Hz)	Desvio (%)
20,6	1,99	1,99	-0,02
48,1	4,97	4,97	0,01
69,1	10,0	10,0	0,03
81,5	15,1	15,1	0,23
96,5	25,0	24,8	0,46
117,3	50,0	49,6	0,69
138,1	100,0	98,9	1,06
159,0	200,1	197,7	1,21
181,0	416,5	410,3	1,49
201,6	830,0	815,8	1,70
222,6	1.668,3	1.636,2	1,92
242,4	3.231,0	3.162,6	2,12
264,1	6.667,4	6.506,5	2,41
283,8	12.828,2	12.492,4	2,61
304,5	25.617,2	24.860,4	2,95
324,5	49.829,9	48.514,1	2,64
345,2	99.507,5	96.095,4	3,43
353,6	131.681,0	128.127,1	2,70
365,8	197.410,4	192.190,8	2,64
371,9	241.974,0	237.950,0	1,66
378,0	296.597,5	293.939,0	0,90

As tabelas 8-6 a 8-9, mostram um aumento no desvio para as frequências até 100kHz em função das imprecisões dos pontos calculados. Para a diminuição destes desvios, ao ser solicitado pelo *software* qual “a precisão desejada” o valor fornecido de 0,1% deveria ser reduzido, diminuindo desta forma, os saltos apresentados até as frequências de 100kHz. Acima desta frequência, é possível se perceber um aumento dos desvios, em função das características do gerador desenvolvido. Maiores detalhes sobre estes saltos de frequências para frequências acima de 100kHz serão fornecidos na tabela 9-1 e nos comentários que a seguem.

Uma vez obtidos os pontos de frequência x tempo procedeu-se ao ajuste de uma função exponencial aos mesmos. O resultado foi o de uma curva com período igual a 30,03 segundos, ou seja, uma precisão desejada de 0,1% quando comparado com o período teórico de 30,00 segundos.

A figura 8-4 mostra os resultados obtidos e verifica-se que apresentam um comportamento exponencial.

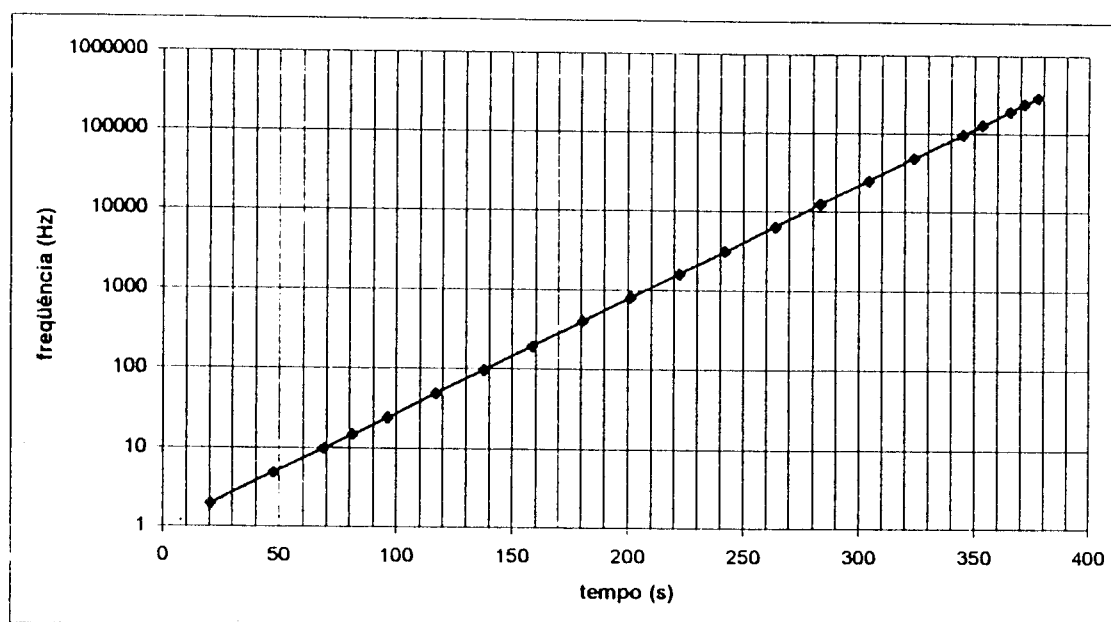


Figura 8-4 Comportamento dos pulsos para um T_r de 30s

O experimento foi repetido com outras condições, e cujos resultados são apresentados e discutidos a seguir.

A tabela 8-7 mostra os resultados obtidos com um período teórico de 20,00 segundos, e cujo ajuste dos pontos obtidos resultou num período “medido” de 20,04 segundos, ou seja o período teórico foi reproduzido com um desvio de 0,2%.

Tabela 8-7 Exponencial gerada para um período de 20s e um desvio de 0,1%

Tempo (s)	freq. teor. (Hz)	freq. med. (Hz)	Desvio (%)
13,72	1,99	1,99	-0,00
32,04	4,96	4,96	-0,01
46,03	9,99	10,00	-0,09
54,37	15,2	15,1	0,11
64,35	25,0	24,9	0,35
78,20	49,9	49,6	0,66
92,06	99,8	98,7	1,10
106,0	200,1	197,5	1,27
120,6	416,1	410,0	1,47
134,5	831,8	817,3	1,74
148,3	1.662,8	1.630,9	1,92
161,6	3.227,5	3.156,6	2,20
176,1	6.667,4	6.514,9	2,29
189,2	12.814,2	12.461,2	2,75
203,0	25.617,2	24.860,5	2,95
216,4	50.048,5	48.514,2	3,07
230,3	100.053,5	97.979,7	2,07
238,5	151.314,8	146.969,5	2,87
244,1	200.019,9	192.190,9	3,91
247,9	241.180,9	237.950,0	1,34
252,4	302.497,8	293.939,0	2,83

Para esta tabela observa-se o aumento dos desvios como já mencionado nos comentários da tabela 8-6.

A figura 8-5 Apresenta os resultados obtidos para um período T_r de 20s.

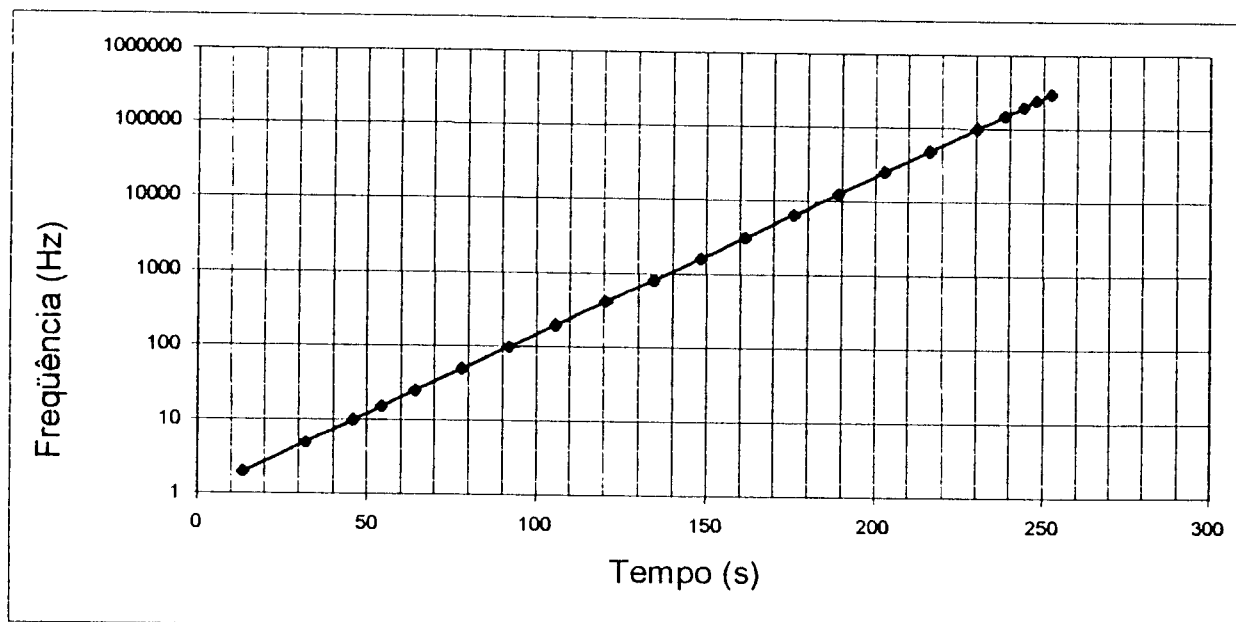


Figura 8-5 Comportamento dos pulsos para um Tr de 20s

O próximo valor a ser testado foi para um valor de Tr de 13s, Os resultados estão apresentados na tabela 8-8 e na figura 8.6.

Tabela 8-8 Valores obtidos para um valor de Tr de 13s

Tempo (s)	freq. teor. (Hz)	freq. med. (Hz)	Desvio (%)
8,79	1,97	1,97	-0,09
20,8	4,96	4,95	0,08
29,9	9,96	9,93	0,27
35,3	15,1	15,1	-0,02
41,8	25,0	24,9	0,27
50,8	49,9	49,5	0,74
59,8	99,6	98,5	1,08
68,8	199,0	196,4	1,30
78,4	416,0	409,1	1,66
87,4	830,9	816,5	1,74
96,4	1.659,9	1.625,0	2,10
105,4	3.332,6	3.257,5	2,26
114,4	6.657,3	6.498,0	2,39
122,9	12.772,2	12.430,2	2,68
132,0	25.643,1	24.984,7	2,57
140,6	49.947,5	48.514,1	2,87
149,5	98.773,1	96.095,2	2,71
155,0	150.210,7	146.969,6	2,16
158,4	196.316,7	192.190,6	2,10
161,8	253.995,8	249.847,5	1,63
163,8	297.047,3	293.938,3	1,047

Neste caso, o ajuste dos pontos gerados resultou num período “medido” de 13,02 segundos, ou seja, um desvio inferior a 0,2%.

A figura 8-6 mostra os resultados obtidos e se verifica o comportamento exponencial para o T_r escolhido (13s).

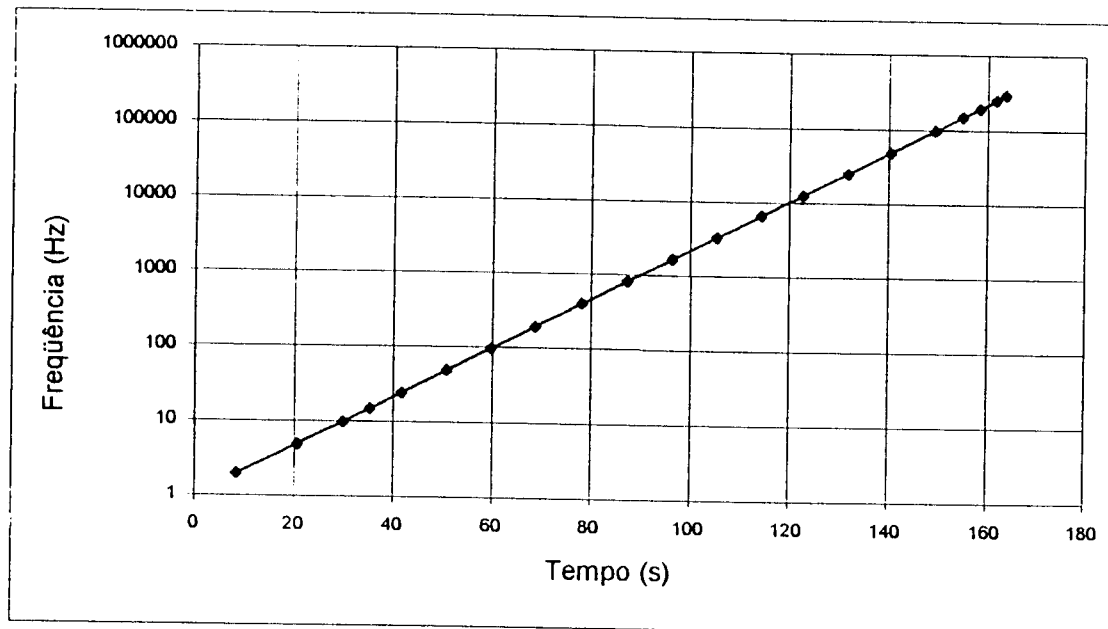


Figura 8-6 Comportamento dos pulsos para T_r igual a 3,00segundos

O próximo valor a ser testado foi para um valor de T_r de 3,00s, este valor foi escolhido por ser o do final de escala do indicador da mesa de controle.

Desta forma se podia verificar que o gerador poderia ser utilizado até a última escala do indicador da mesa de controle. Os resultados para este caso estão apresentados na tabela 8-9.

Tabela 8-9 Valores obtidos para um Tr de 3,00s

Tempo (s)	freq. teor. (Hz)	freq. med. (Hz)	Desvio (%)
2,36	2,20	2,17	1,17
4,73	4,83	4,855	-0,29
6,70	9,32	9,57	-2,60
8,40	16,5	16,5	-0,07
9,65	25,0	25,1	-0,45
11,69	49,2	48,7	1,04
13,60	92,8	91,7	1,19
15,89	199,6	195,6	2,02
17,99	402,2	393,3	2,21
20,0	792,7	775,8	2,13
22,1	1.596,9	1.563,0	2,12
24,2	3.216,9	3.130,9	2,67
26,3	6.340,1	6.131,2	3,29
28,4	12.772,2	12.368,7	3,16
30,5	25.729,5	24.984,8	2,89
32,4	48.538,2	47.590,1	1,95
34,5	99.944,1	96.095,4	3,85
35,7	148.201,1	142.770,0	3,66
36,6	196.978,8	192.190,8	2,43
37,2	245.172,6	237.950,0	2,95
37,8	298.551,4	293.938,9	1,54

Novamente, o ajuste dos pontos obtidos resultou num período “medido” de 3,01 segundos, ou seja, um desvio de 0,3%.

Também é possível verificar pelas tabelas de 8-6 a 8-9 que com a diminuição do período Tr existe uma tendência do aumento médio dos desvios apresentados, principalmente até as frequências de 100KHz em função do rápido crescimento da função exponencial, e acima dos 100kHz continuam válidos os comentários já anteriormente efetuados.

A figura 8-7 apresenta os resultados encontrados na tabela 8-9

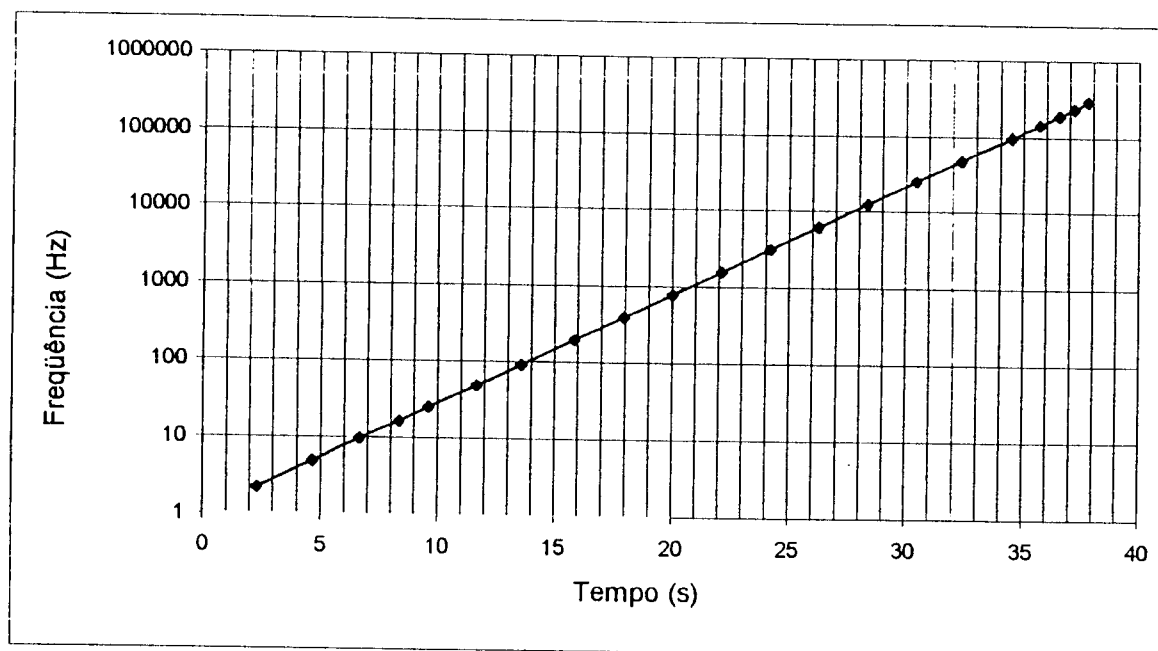


Figura 8-7 Comportamento dos pulsos para T_r igual a 3,00 segundos

Durante os testes de bancada, monitorou-se a forma de onda do sinal (pulso) de saída. Este apresentou uma forma de onda satisfatória para as várias frequências geradas pelo gerador.

Utilizando-se um osciloscópio digital, registrou-se a forma de onda que saía do cartão desenvolvido, primeiro sem estar acoplado à entrada do pré-amplificador do reator, obtido para testes.

A amplitude do pulso ajustado foi em função das especificação de entrada de testes do pré amplificador que solicita uma amplitude mínima de 1,3V. Ajustamos para aproximadamente 2,6V oferecendo uma margem de segurança em relação a tensão mínima solicitada.

Comparando a forma do pulso antes e após o acoplamento do cartão ao pré-amplificador (figura 8-8 e 8-9, respectivamente) observa-se que

a forma de onda quase não apresenta distorção quando o sinal é injetado na entrada do pré amplificador.

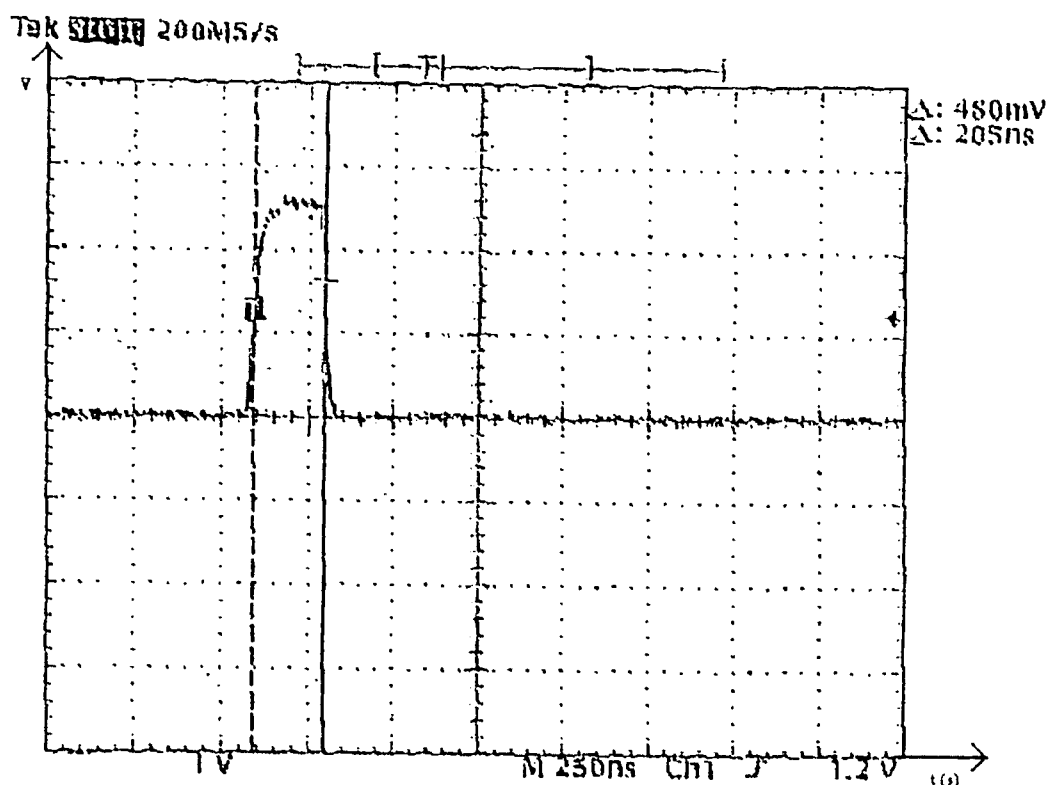


Figura 8-8 Sinal de saída sem estar conectado ao pré amplificador

Nas figuras 8-8 a escala no eixo dos tempos é de 250ns/divisão, e no eixo das tensões 1 volt/divisão.

Esta figura mostra que os sinais gerados apresentam boa formatação tanto com relação ao tempo de subida como de descida, possui uma largura da ordem de 200ns como proposto neste trabalho e tem um nível superior de tensão bastante estável, podendo ser aplicado a entrada de “teste” de um pré-amplificador sem problemas. Estes pulsos se mantiveram estáveis tanto para as baixas frequências, da ordem de 1Hz, como para as frequências altas, cerca de 2,5MHz.

Assim como na figura 8-8, na figura 8-9, que mostra a forma de onda do sinal após o acoplamento do cartão à entrada de testes do pré-amplificador, a escala dos eixos dos tempos é de 250ns/divisão e no eixo das tensões de 1 volt/divisão.

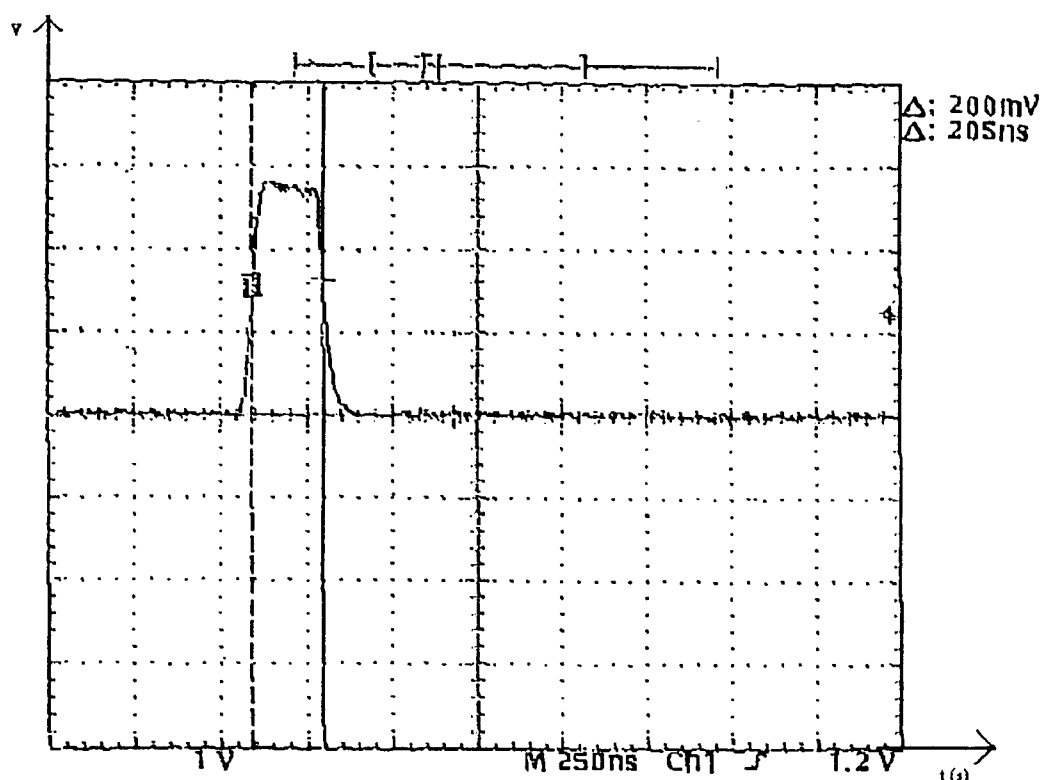


Figura 8-9 Forma do pulso obtido na entrada do pré amplificador do canal de partida do reator.

É possível se observar que não ocorreu distorções no sinal após o mesmo ser conectado ao pré-amplificador da mesa de controle. O que permite dizer que as medidas efetuadas não sofrerão distorções em função dos sinais aplicados na entrada do pré-amplificador.

Como nesta fase se alterou o *software* que realizava a aquisição de dados, acrescentando a este a mudança automática de escala, foi efetuado novo levantamento dos resultados obtidos das entradas existentes.

O *software* final possui a base de tempo variável (0,98s ou 0,197s). Assim sendo para as frequências inferiores a 50KHz o tempo de aquisição é de aproximadamente 1s (0,98s), para frequências acima deste valor o tempo de aquisição é de aproximadamente 0,2s (0,197s). O erro ocorrido para baixas frequências não terá muita influência na avaliação do canal de partida já que as frequências de interesse situam-se acima de 10Hz, onde o erro fica menor que 10%. Na realidade este erro ocorre em função do desvio de uma contagem.

Os resultados são apresentados na tabela 8-10

Tabela 8-10 Máximo erro em frequência dos dados adquiridos pela placa.

Freq. entrada (Hz)	Frequência medida (Hz)		Erro máximo (%)
1	1,0	ou 2,0	-100,00
10	10,2	ou 11,2	-10,00
20	20,2	ou 21,2	-4,950
100	100,6	ou 99,6	1,000
1.000	1.000,4	ou 1.001,4	-0,1000
5.000	5.000,9	ou 4.999,9	0,0200
10.000	10.000,8	ou 9.999,8	0,0820
20.000	20.000,5	ou 19.999,5	0,0050
40.000	40.001,1	ou 40.000,1	0,0025
50.000	50.004,3	ou 49.999,2	0,0102
60.000	60.003,2	ou 59.998,1	0,0085
90.000	90.004,7	ou 89.999,6	0,0057
100.000	100.003,6	ou 99.998,5	0,0051
150.000	150.007,8	ou 150.002,8	0,0033
200.000	200.007,1	ou 200.002,0	0,0026
250.000	250.006,4	ou 250.001,3	0,0020
300.000	300.005,6	ou 300.000,5	0,0017
330.000	330.007,2	ou 330.002,1	0,0015
333.000	333.006,3	ou 333.001,2	0,0015

8-3 Terceira fase de testes

Após a conclusão dos testes de laboratório teve início a realização dos testes de campo.

Nesta fase, o cartão desenvolvido teve as suas entradas e saída conectadas à instrumentação da mesa de controle do reator IEA-R1 da seguinte forma. Desligou-se a alta tensão que alimenta o detector de radiação do canal de partida (Campbell) e na entrada de "teste" do pré-amplificador de pulsos, se conectou a saída do gerador do cartão desenvolvido. Adicionalmente, as entradas do cartão desenvolvido foram conectadas às saídas do medidor de taxa de contagem, do medidor de período e da saída para contador ("scaler"), conforme ilustrado na figura 8-10.

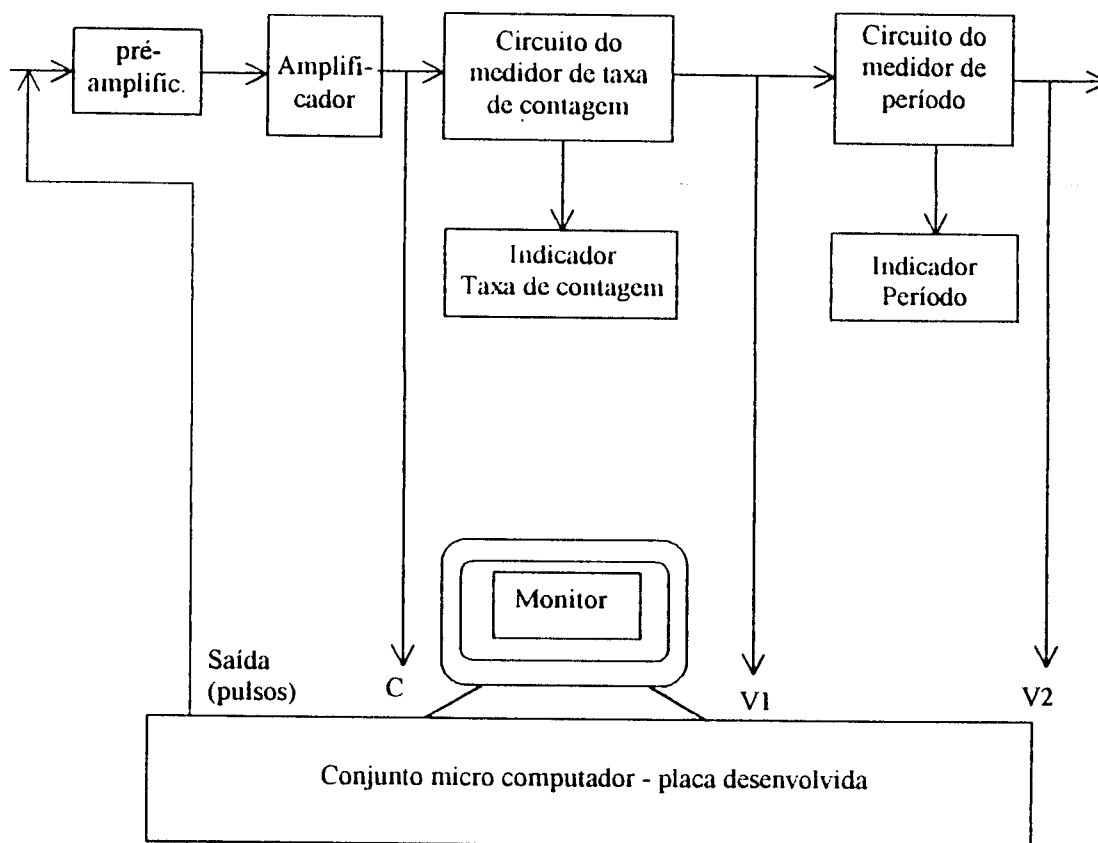


Figura 8-10 Diagrama de blocos mostrando as ligações das entradas e saídas do cartão desenvolvido às entradas e saídas da mesa de controle

Onde:

C é a saída de pulsos para o contador (*scaler*).

V1 é a tensão de saída do circuito medidor da taxa de contagem.

V2 é a tensão de saída do circuito medidor de período.

Inicialmente foram geradas várias frequência fixas onde se verificou o comportamento do medidor de taxa de contagem e o medidor de período. A saída para contador *scaler* foi utilizada apenas para confirmar a frequência gerada.

O indicador de período deve apresentar valores negativos, para transientes nos quais o fluxo neutrônico do reator diminui com o tempo, e valores positivos, quando o fluxo aumenta com o tempo. Quando o sinal é estável, ou seja, em regime estacionário, o indicador de período deve indicar “infinito”. Do ponto de vista prático, em termos de sinais eletrônicos, como o sinal do circuito de período é um sinal de tensão que varia de 0 à 10Vcc, isto significa que o valor de 0Vcc corresponde ao maior período negativo, no caso do reator IEA-R1m, ele é da ordem de -30 segundos. No caso de regime estacionário, o período “infinito” corresponde no circuito a um nível de tensão igual a 1,22Vcc (valor medido durante os testes e aqui chamado de “zero vivo”) e, para um período positivo, próximo de zero (3s), o nível de tensão no circuito de período chega a 10Vcc

Como no início só temos pulsos, o canal Campbell ainda não está atuando, a tensão do sinal de saída é somente devido ao canal de pulso, porém conforme a frequência vai aumentando começa a ocorrer a atuação do canal Campbell na última década. Desta forma, ao se observar os resultados obtidos, nota-se que a partir do meio da última década tem início a influência do canal Campbell.

A figura 8-11 apresenta os resultados obtidos na saída do medidor de taxa de contagens, em função das frequências aplicadas ao mesmo.

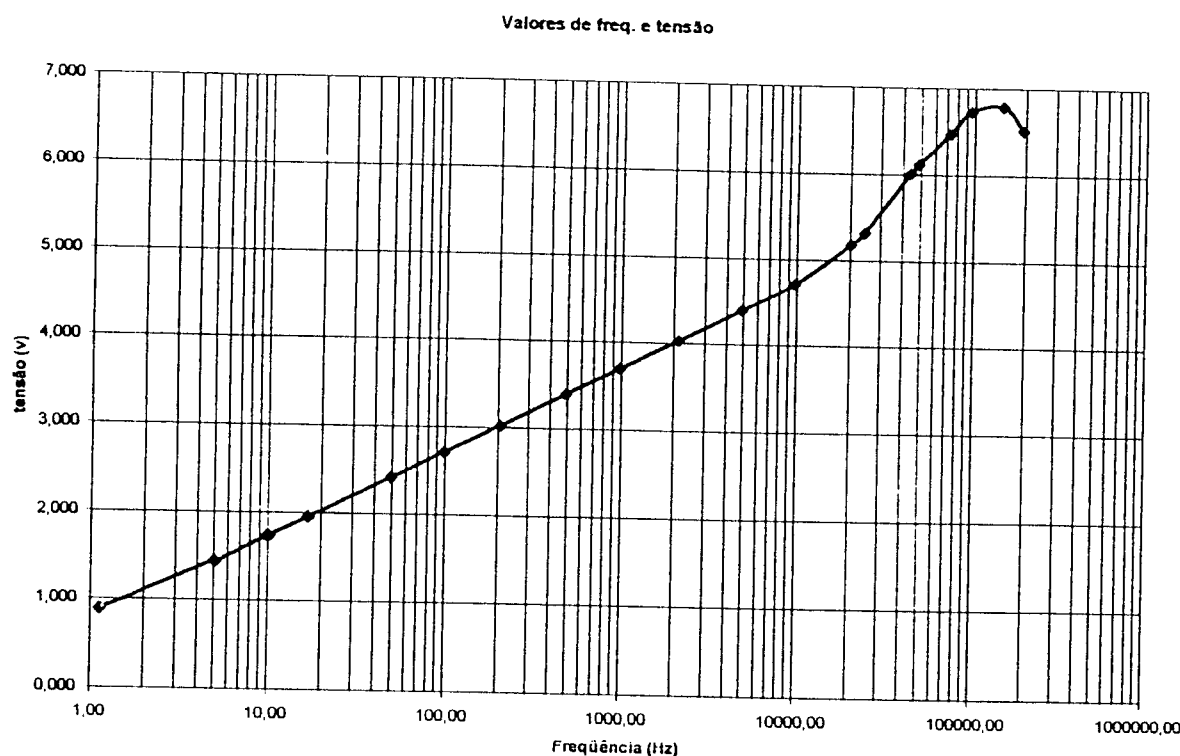


Figura 8-11 Comportamento do medidor de taxa de contagem para varias frequências de entrada.

Através da figura 8-11 e da figura 8-12 que apresenta a tensão de saída na saída do circuito medidor de taxa de contagem em função da indicação no painel da mesa de controle é possível verificar que o medidor segue o comportamento esperado em cerca de 4 décadas, apresentando imperfeições na última década. Segundo o manual fornecido pela empresa que montou a mesa de controle do reator IEA-R1m a variação de tensão de saída é logarítmica com uma variação de 1V/década. Pelos valores obtidos observa-se a relação de 1V/década é obedecida com alguma imprecisão, no intervalo de 1 a 20KHz.

Na faixa superior a 20KHz, que deveria corresponder à uma tensão entre 5 e 6V na saída do circuito medidor, a relação já não é mais

válida. Em consulta ao manual fornecido, concluímos que esta faixa corresponde à faixa de transição da faixa de pulso para a região Campbell o que levou a obtenção de um resultados um pouco diferente dos resultados esperados, como já mencionado, uma vez que os resultados foram obtidos na saída do circuitos somador canal de pulso/canal Campbell, ou seja, qualquer tratamento do canal de pulso deve se limitar a frequências inferiores a 20KHz

A figura 8-12 mostra a relação entre o nível de tensão na saída do circuito do medidor da taxa de contagem e a indicação apresentada no painel da mesa de controle, (em termos de % de potência), que tem uma escala logarítmica

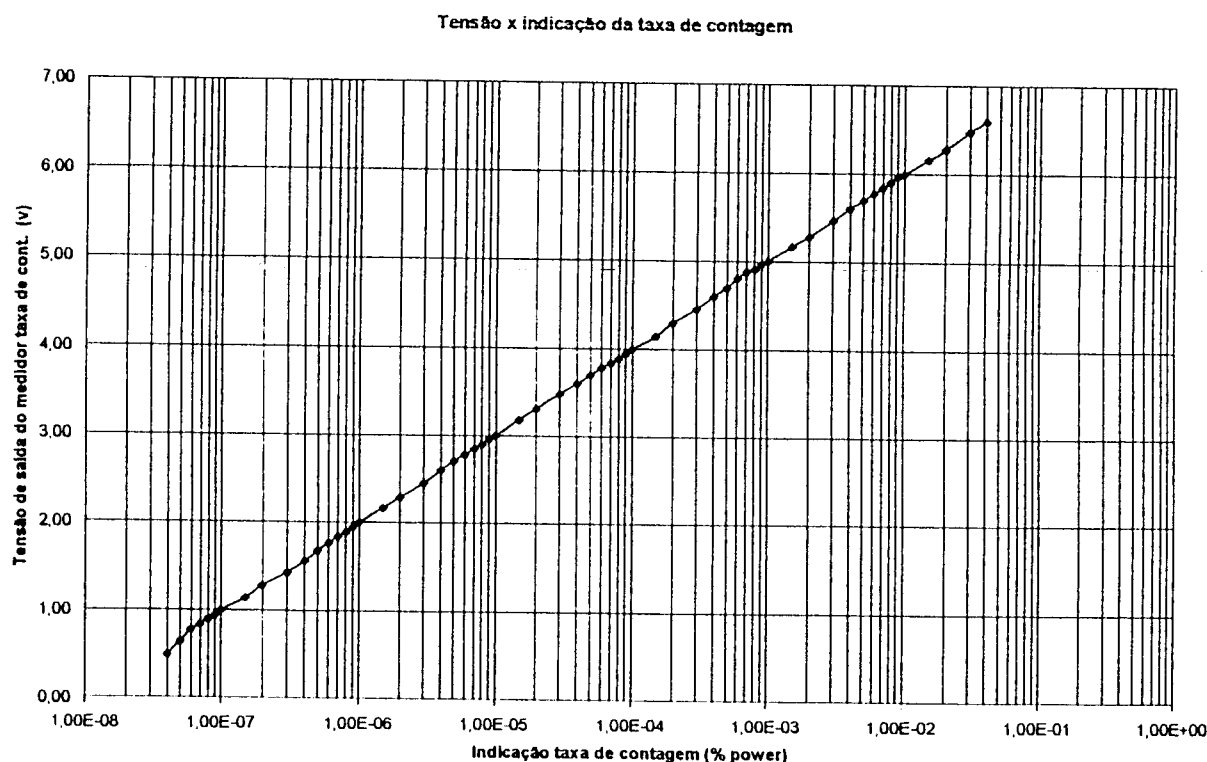


Figura 8-12 Tensão de saída do medidor de taxa de contagem e o valor indicado em % power da mesa de controle.

Como o circuito é logarítmico, observa-se que a relação de 1V/década é obedecida para os valores apresentados pelo indicador da mesa de controle.

Com o uso das figuras 8-11 e 8-12 é possível estabelecer uma relação entre, porcentagem de potência (% power), frequência e tensão de saída do medidor taxa de contagem, bastante útil pois, tendo-se uma das variáveis, pode-se obter qualquer uma das outras duas.

Ainda como resultado dos testes de campo, verificou-se se os pulsos aplicados à entrada do pré-amplificador chegavam até os circuitos eletrônicos dos medidores de taxa de contagem e período. Para tal se conectou um freqüencímetro a saída para contador (*scaler*) e se aplicou na entrada do pré-amplificador uma frequência de pulsos conhecida.

Pela tabela 8-11 observa-se que, como era esperado, a frequência aplicada na entrada (pulsos no tempo) era detectada na saída para contador (*scaler*) da mesa de controle, apresentando a mesma frequência de entrada.

Tabela 8-11 Freqüência aplicada a entrada do pré-amplificador e freqüência medida na saída para contador

Freqüência aplicada à entrada (Hz)	Freqüência medida na saída para contador (Hz)
192.190,1	192.190,1
146.968,9	146.968,9
96.095,0	96.095,0
72.419,5	72.419,5
48.514,0	48.514,0
24.257,0	24.257,0
9.740,6	9.740,6
980,75	980,75
99,04	99,04
49,77	49,77
9,99	9,99
5,02	5,02
1,13	1,13

Uma vez verificado o comportamento do medidor de taxa de contagem do canal de partida passamos a analisar o circuito de período em condições de regime estacionário. Para tanto com o cartão desenvolvido gerou-se um valor de período (T_r) conhecido, e se mediu a tensão na saída do circuito medidor de período. Lembrando que como o circuito medidor de período mede a variação da tensão na sua entrada, o mesmo só fornece valores diferentes do “zero vivo”, quando as freqüências de entrada variam ou seja, quando variar a tensão de saída do medidor de taxa de contagem. Os valores obtidos estão apresentados na tabela 8-12.

A seguir a figura 8-13 apresenta o comportamento previsto para o medidor de período. Esta figura foi obtida também de modo experimental já a algum tempo, utilizando-se um outro método, e foi tomada como a curva de período prevista.

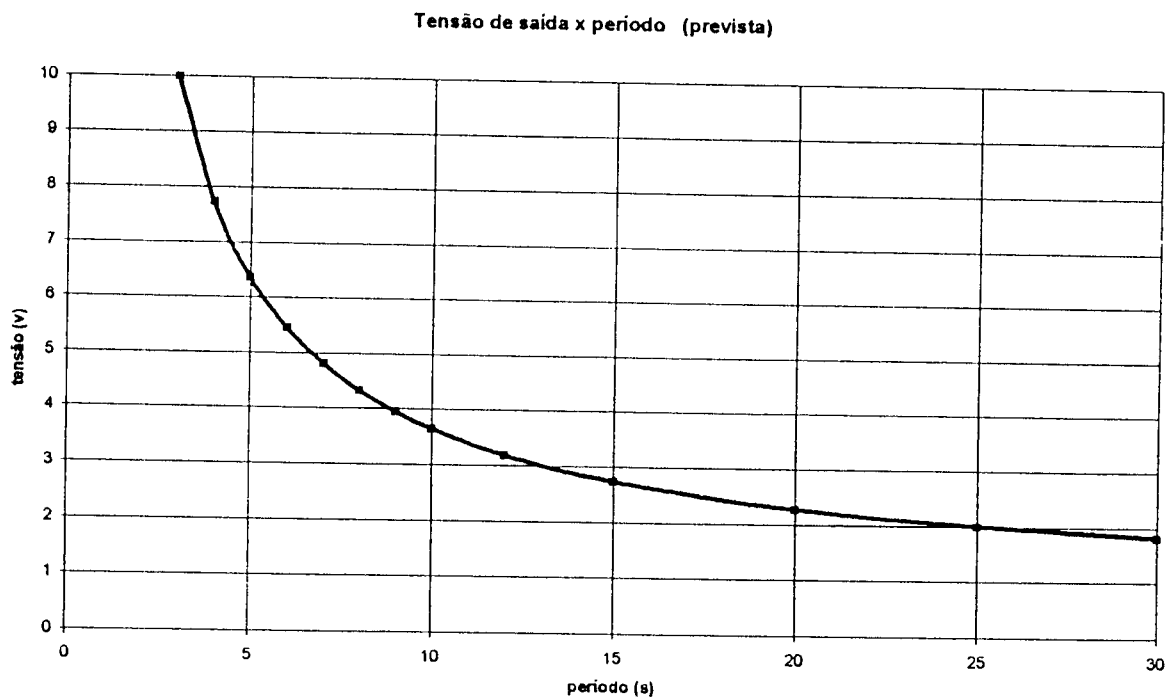


Figura 8-13 Comportamento previsto para o canal de período

Na tabela 8-12 apresentamos os resultados obtidos quando se gerou um período ("Tr") conhecido e se leu o valor apresentado no indicador de período existente no painel da mesa de controle.

Tabela 8-12 Período gerado por *software* e o indicado pela mesa de controle

Período gerado (s)	Período apresentado no indicador da mesa (s)	desvio (%)
30	entre 30s e infinito	
25	25	0
20	25	25
15	17,5	16,6
12	12,5	4,2
10	12,5	25
7	8	14,3
4		

Como o indicador de período da mesa de controle, apresenta alguns valores no intervalo de +30s a +3s, em indicadores analógicos, geralmente ao se efetuar uma leitura entre dois valores consecutivos, a precisão lida será de “metade” da divisão.

Desta forma, quando se gerou as funções exponenciais de períodos 25s, 20s, 15s, 12s e 10s, os valores dos períodos apresentados no indicador da mesa ficaram fora destes valores, em geral um pouco acima destes. Assim sendo, se adotou o valor intermediário entre os dois intervalos existentes no indicador da mesa de controle, isto é, se o ponteiro do indicador de período ficou entre 20s e 30s se adotou 25s, se entre 15s e 20s se adotou 17,5s e se entre 10s e 15s o valor intermediário de 12,5s (tabela 8-12).

Logo, para se calcular os desvios da tabela 8-12 utilizou-se este critério de valores. Deste modo o maior desvio apresentado foi de 25% observado para um período gerado de 20s. Este valor pode ser aceitável pois o ajuste do “*set point*” de desligamento é de 12s, portanto está bastante abaixo deste. O segundo desvio de 25% apresentado foi para um período gerado de 10s. Como o reator é desligado em 12s, em 10s o reator já se encontra desligado e este desvio pode ser considerado aceitável, além disso, o valor de 12s é sempre escolhido de forma bastante conservativa. Devemos destacar porém que não é o indicador de período que aciona o desligamento do reator, este apenas informa ao operador. O circuito eletrônico que desliga o reator se mostrou ser bastante preciso como se observa na tabela 8-13. Ainda assim, ao se observar a tabela 8-12, obteve-se para um período de 12s, um desvio de 4,2%, um bom valor para este tipo de indicador analógico.

As figuras 8-15 a 8-23 que serão discutidas com mais detalhes adiante, mostram o comportamento do canal para cada condição de período simulado.

A seguir apresentaremos os resultados obtidos durante os testes dinâmicos efetuados no canal de partida do reator IEA-R1m.

Em condições de operação, os pulsos estão associados com ruídos que chegam na entrada do pré-amplificador. Para se eliminar estes ruídos, o amplificador possui um circuito que discrimina pulsos dos ruídos, de forma a permitir que na saída do amplificador somente os pulsos estejam presentes sem o ruído. Como isto é feito por um circuito que possui um ajuste, o teste efetuado a seguir verifica se o discriminador está adequadamente ajustado. Para tal foi gerado uma função exponencial com período (T_r) igual a 30s, iniciando-se em 1 Hz e alcançando a frequência de 300kHz. A figura 8-14

apresenta a frequência medida na saída para o contador (*scaler*) do circuito, em função do tempo.

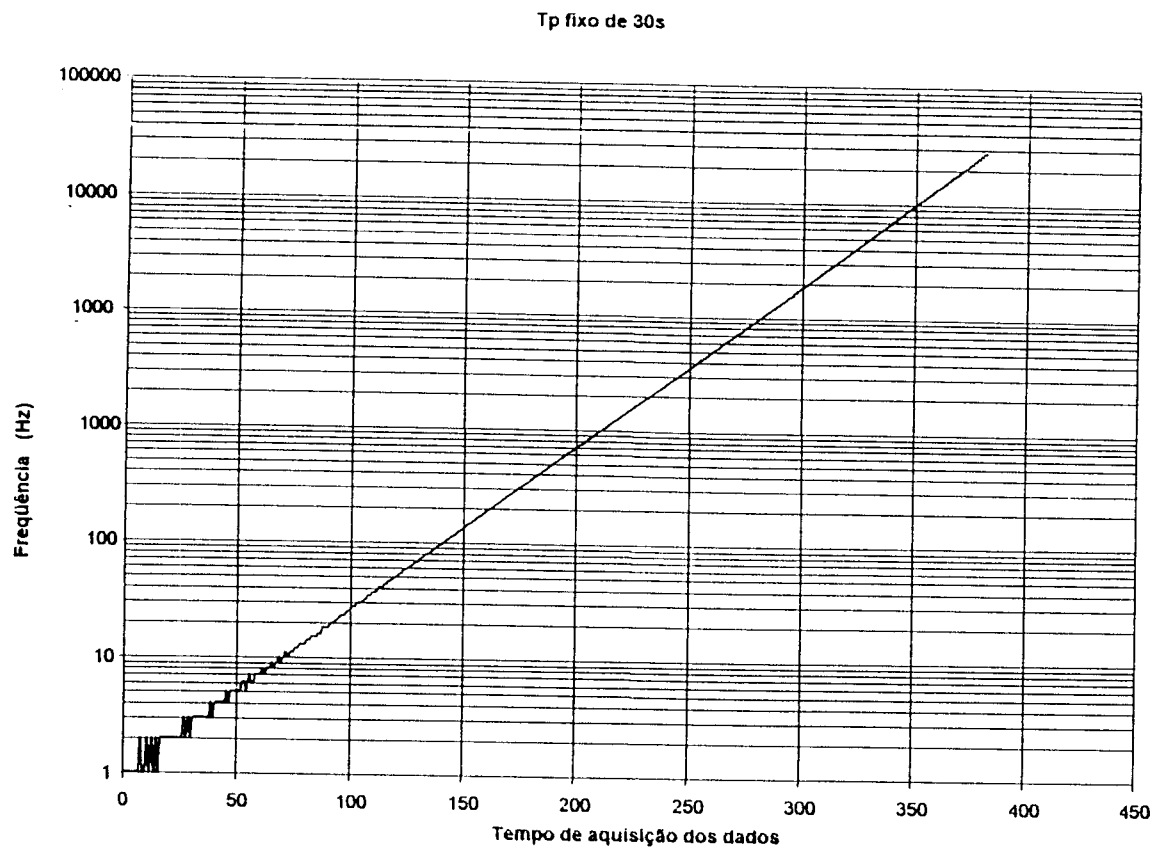


Figura 8-14 Comportamento das frequências de entrada monitoradas na saída da contador (*scaler*)

A seguir a figura 8-15 apresenta os resultados obtidos para um Período (T_r) fixo de 30s

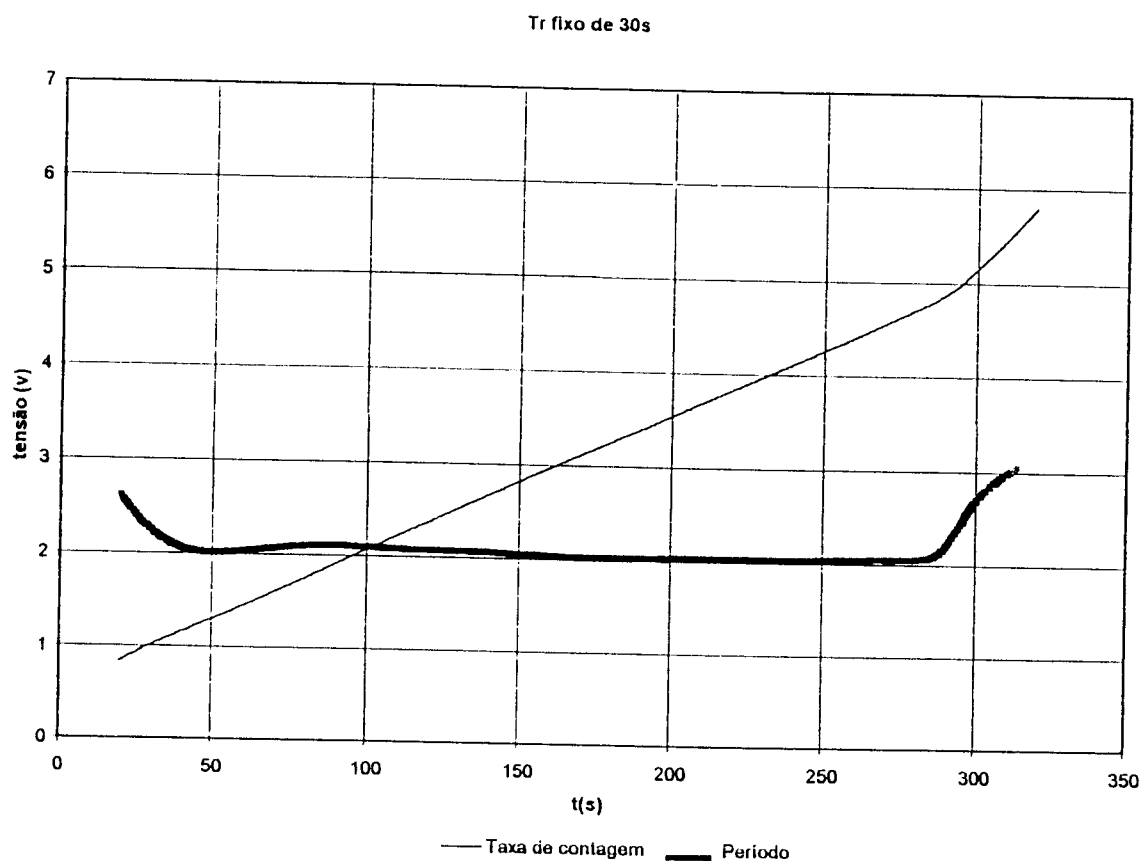


Figura 8-15 Comportamento dos medidores taxa de contagem e período x tensão de saída dos respectivos medidores, para um período (T_r) de 30s.

Na figura 8-15 observa-se duas curvas, que representam o nível de tensão na saída do circuito medidor taxa de contagem e o nível de tensão na saída do circuito medidor de período

Pela figura observa-se que, conforme esperado, o circuito medidor de taxa de contagem que é logarítmico apresenta uma reta e como o período pode ser entendido como proporcional ao inverso da derivada da taxa e contagem, apresentou uma reta com um valor aproximadamente constante.

Observando-se estes valores obtidos para o circuito medidor taxa de contagem, nota-se que há uma relação de 1V/década, mesmo sob testes na

forma dinâmica, ao ser comparado com os valores obtidos para frequência fixas (testes estáticos) como o que se obteve na figura 8-11.

Uma análise feita com os valores das tensões obtida nas figuras 8-15 e 8-11 permite determinar se a aplicação de transientes no circuito altera a relação tensão/frequência definida para condições de regime estacionário, ou seja, se a calibração do circuito é afetada pelo transiente. Para tanto, escolhe-se dois valores de tensão na figura 8-15 de tal forma que o intervalo seja de 1V e verifica-se qual o tempo de aquisição associado a estes.

Com o tempo encontrado, substituir na expressão $f = e^{(t/Tr)}$ onde t é o tempo de aquisição e Tr é o valor do período da figura escolhida para ser comparada com a figura 8-11, neste caso, a figura 8-15. Desta forma se obtém dois valores para f . Com os valores de f obtidos, verifica-se na figura 8-4 se estes correspondem a um intervalo de variação de tensão de 1V.

Caso as tensões encontradas correspondam a uma variação de frequência de uma década, fica confirmado que a relação tensão/frequência (volts/década) se mantém inalterada.

Analisando-se a figura 8-15 verifica-se que o comportamento do período apresentou uma oscilação no seu início, porém este se estabilizou e apresentou boa regularidade em toda a faixa de pulso, mudando seu valor apenas próximo da faixa Campbell.

Comparando o valor obtido com o apresentado no medidor de período da mesa de controle figura 8-13, observa-se para os valores de período de 30s (2,03V), há um desvio em tensão de 12% (tabela 8-13) quando

comparado o valor esperado com o valor obtido. Porém para períodos acima de 30s o reator é considerado seguro e adicionalmente, quando o período medido pelo medidor de período fica muito grande (acima de 30s), o erro tende a aumentar pois é calculado em um pequeno intervalo e extrapolado para grandes valores, além disso, quando da obtenção dos dados para a curva anteriormente obtida (prevista), não se dispunha de um gerador de função exponenciais podendo estes serem mais imprecisos, porém pode ser considerado um valor aceitável para um canal analógico, pois ao se aproximar dos valores de *set point* de desligamento estes desvios vão se reduzindo (tabela 8-13).

A seguir apresentamos os resultados obtidos para um período de 25s. Este período é utilizado quando se deseja uma lenta subida de potência, e é também bastante utilizado na partida do reator.

Os resultados são apresentados na figura 8-16.

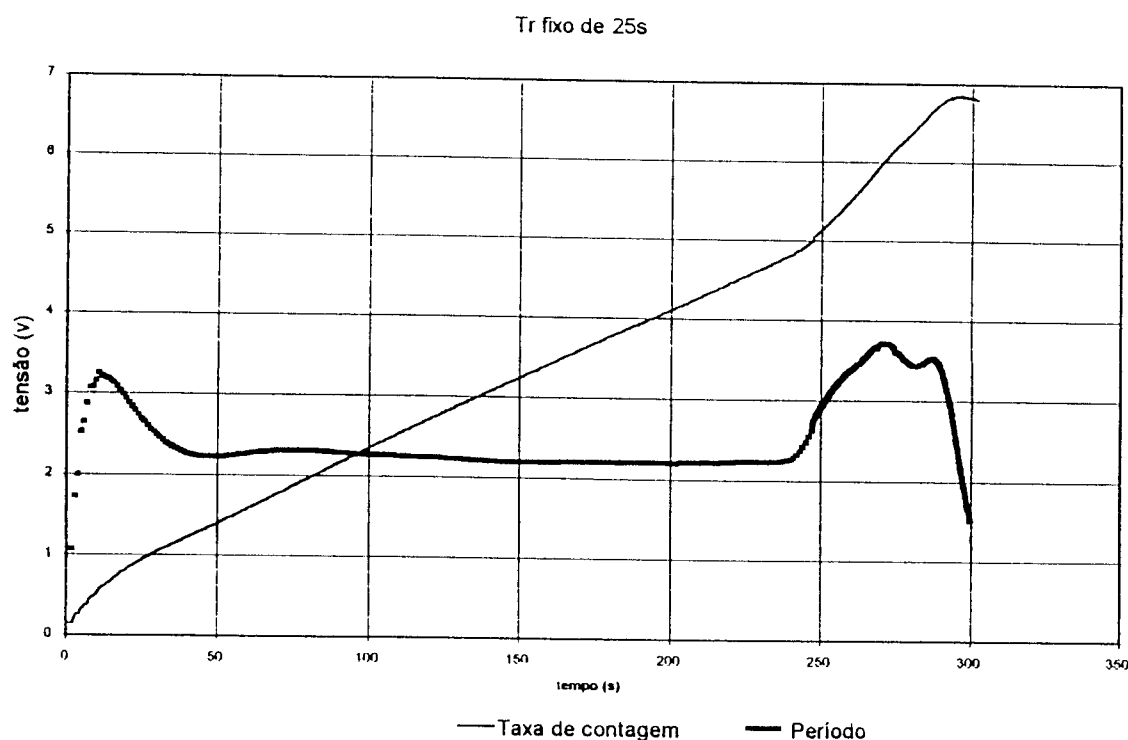


Figura 8-16 Comportamento dos medidores taxa de contagem e período x tensão de saída dos respectivos medidores, para um período (T_r) de 25s

Pelos valores obtidos nota-se para esta faixa um desvio em tensão de 10%, quando comparado o valor esperado com o valor obtido 2,20V (tabela 8-13). Estes resultados também são considerados aceitáveis para o indicador de período.

A seguir são apresentados os dados obtidos simulando um período de 20s. Geralmente em condições de partida normal o reator opera ao redor de 20s, daí sua importância neste trabalho.

Analizando os sinais gerados na saída do circuito medidor de taxa de contagem e na saída do circuito medidor de período, observa-se um comportamento semelhante ao observado para o caso anterior (período igual a 25s) e verifica-se que o valor da tensão na saída do circuito medidor de período se estabilizou ao redor de 2,45Vcc.

Se compararmos com o valor obtido no figura 8-17 temos um desvio em tensão de 7,9% entre o valor de tensão previsto e o valor obtido (tabela 8-13) os valores são aceitáveis para o medidor de período.

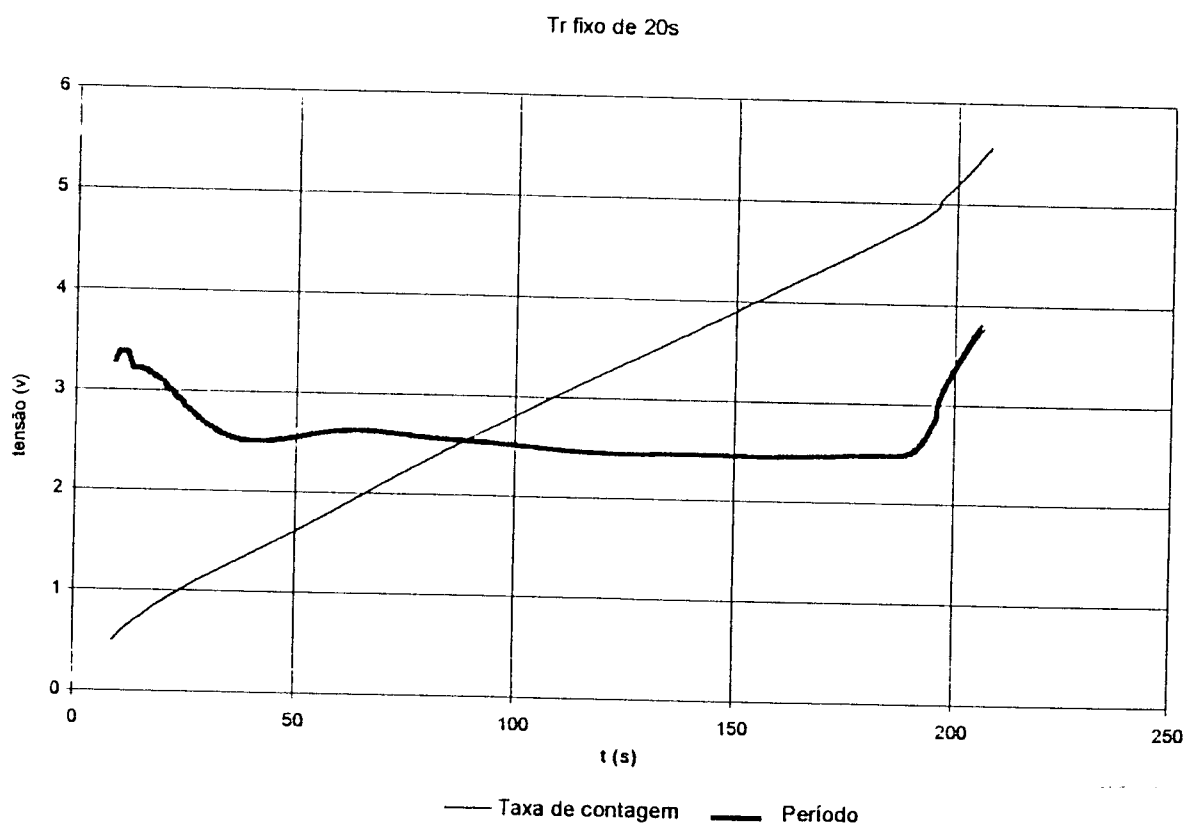


Figura 8-17 Comportamento dos medidores taxa de contagem e período x tensão de saída dos respectivos medidores, para um período (T_r) de 20s

A seguir são apresentados os resultados obtidos para um período simulado de 12 segundos, que é o valor do ajuste do *set point* estabelecido para o desligamento do reator IEA-R1. Quando a taxa de subida da potência do reator for maior que a equivalente a uma exponencial, com período 12 segundos é enviado um sinal ao sistema de proteção, para efetuar o desligamento do reator.

Desta forma é possível verificar o comportamento dinâmico do canal nuclear que mostra o aumento da potência do reator considerando-se o período no caso limite de operação (figura 8-19).

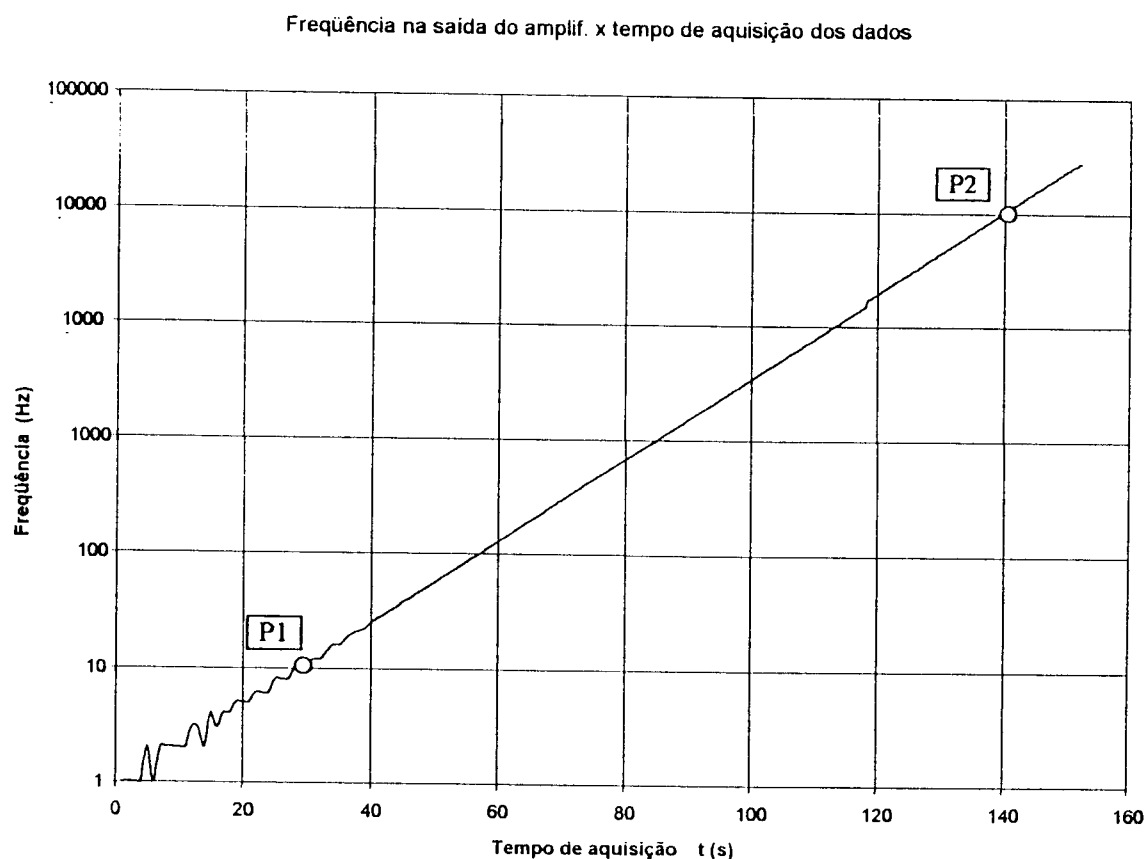


Figura 8-18 Comportamento das frequências de entrada monitoradas na saída da contador (*scaler*).

Antes porém, a figura 8-18 mostra o comportamento do canal, na saída do amplificador, considerando-se um período de 12 segundos. O objetivo desta figura é mostrar que para a verificação do ajuste do “*set point*” de desligamento do reator IEA-R1m que é de 12s, procurou se certificar que não ocorreu problemas com o sinal fornecido pelo gerador. Desta forma foi levantada a figura 8-18 onde se observa-se que esta não apresentou distorções significativas, conforme se pode verificar pelo sinal que foi entregue aos circuitos do medidor taxa de contagem e período.

Nesta figura podemos observar que a taxa de contagem segue o comportamento exponencial (o que dá uma reta num gráfico logaritmo) e para confirmar efetivamente que o período se aproxima dos 12s, calculamos a equação que rege a variação entre os pontos P1 e P2 que é dada por:

$$P2 = P1e^{(t/Tr)} \quad 8-1$$

Onde:

para P2 obtemos, 140(s) e 102555(Hz)

e para P1, 30(s) e 11,18(Hz)

logo $t = 110(s)$

substituindo e calculando Tr obtêm-se o valor de 12,05s. Portanto,

$$P2 = P1e^{(t/12,05)} \quad 8-2$$

com um desvio de 0,4%, desta forma o sinal entregue aos medidores de taxa de contagem e período apresentou valores satisfatório.

Na figura 8-19 verifica-se que o comportamento do circuito medidor de período, que é efetivamente o que realiza o desligamento do reator, possui um comportamento similar aos casos anteriores, embora a taxa de subida seja maior que nos outros casos, o que ocasionou um tempo um pouco maior para estabilizar-se. Porém se observa que o medidor de período se estabilizou-se ao redor dos 3,2Vcc e, comparando este valor com o apresentado na figura 8-13 tensão de saída x período previsto e o valor da

tabela 8-13, verifica-se que apresentaram um mesmo valor, mostrando que este medidor esta operando de modo satisfatório, porém apresentado como nos casos anteriores uma oscilação no início do seu funcionamento.

Além disso observou-se que durante a realização destes testes, de fato, foi acionado o circuito de desligamento do reator, e que na mesa de controle ficava sinalizada a causa como sendo desligamento por período.

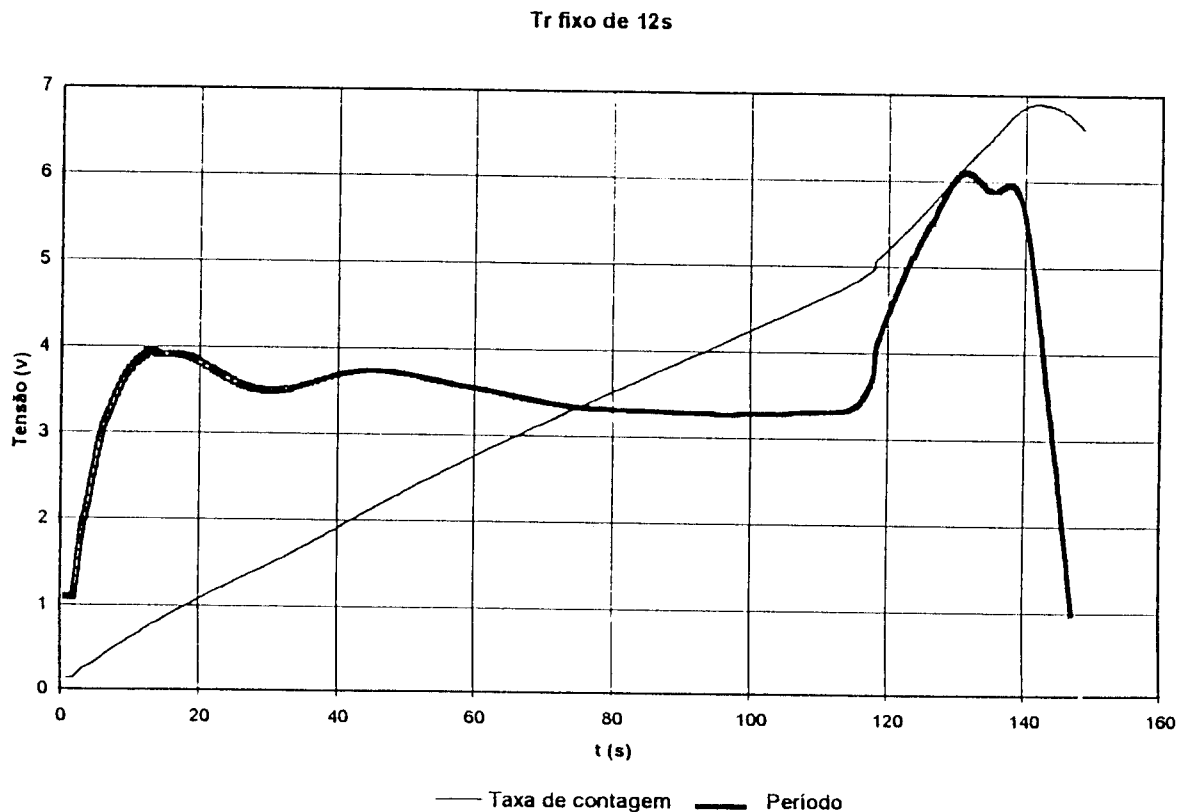


Figura 8-19 Comportamento dos medidores taxa de contagem e período x tensão de saída dos respectivos medidores para um período (Tr) de 12s

A próxima análise foi feita assumindo um valor de período inferior ao ajuste de "set point" isto é, um valor de Tr igual a 10s (figura 8-20).

O valor de T_r igual a 10s foi escolhido porque já é um valor onde os circuitos que realizam o desligamento do reator já devem ter sido acionado. O resultado mostrou que mesmo nesta condição, apesar de a mesa ter acionado os circuitos de desligamento do reator, o medidor continuou monitorando, de modo adequando, o comportamento do canal de partida.

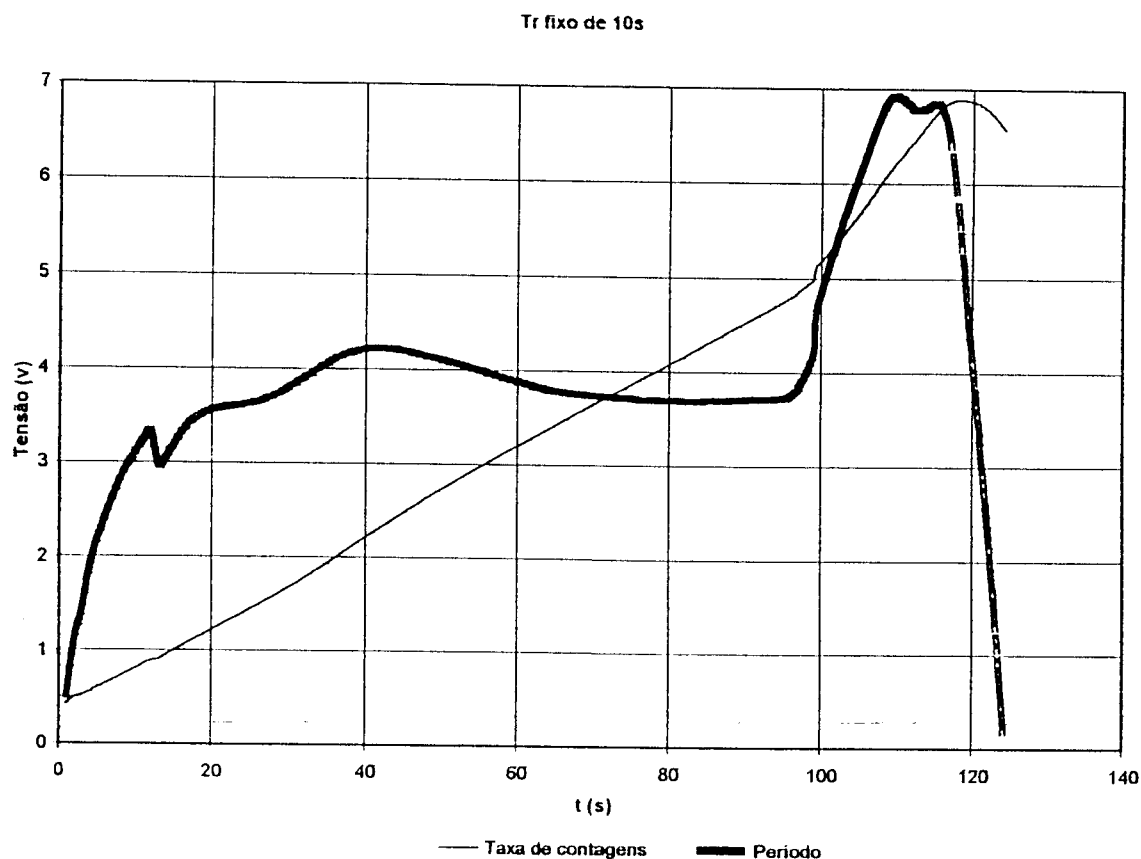


Figura 8-20 Comportamento dos medidores taxa de contagem e período x tensão de saída dos respectivos medidores para um período (T_r) de 10s

Finalmente apresentamos os resultados obtidos no final de faixa de operação dos indicadores da mesa de controle, para um período de 4s (figura 8-22).

Embora o valor de fim de escala do indicador da mesa de controle seja para um período de 3s (correspondendo a um valor de $10V_{cc}$ de fundo de escala), escolheu-se o valor de 4s para evitar a ocorrência de uma possível saturação do valor de fundo de escala.

Como a taxa de subida dos pulsos é bastante rápida, houve dificuldade para o medidor de período se estabilizar porém vale lembrar que na prática esta condição representa o fim de faixa de operação do medidor e lembrando que o “*set point*” de desligamento esta ajustado em 12s, este valor esta bastante além do nível de desligamento.

Mesmo assim, para os valores de 30 à 40s verifica-se uma tendência de estabilização ao redor de $7,7V_{cc}$, vide figura 8-22.

Analisando o resultado da figura 8-22, observamos que o circuito demora a atingir o equilíbrio final (cerca de 30s), mas, o que é mais importante, em menos de 6s ele atinge o nível de desligamento do reator, que é de 3,2V.

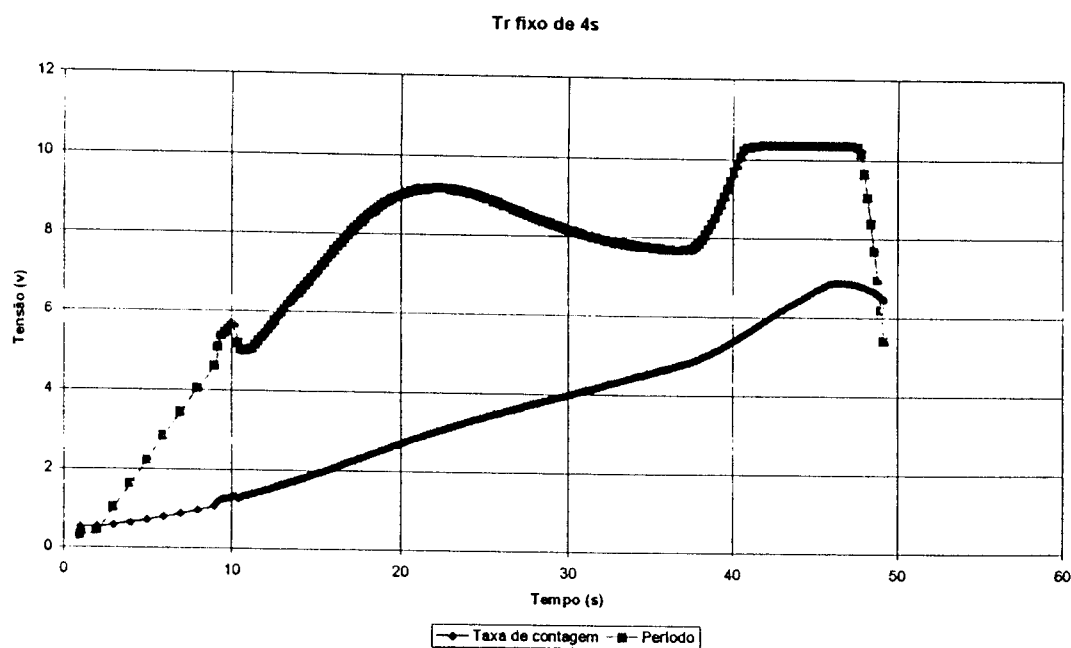


Figura 8-22 Comportamento dos medidores taxa de contagem e período x tensão de saída dos respectivos medidores, para um período (Tr) de 4s.

A mesa de controle do reator IEA-R1 possui um registrador gráfico que registra o comportamento ou as ocorrências que ocorrem no canal logarítmico.

Apresentamos a seguir, um exemplo do sinal obtido pelo registrador gráfico da mesa de controle, figura 8-23, ao se gerar um período simulado de 30 segundos.

Comparando-se esta figura, com a figura 8-15, observamos que as curvas do medidor taxa de contagem apresentaram um comportamento semelhante, embora tenham sido medidas de forma diferente.

Nota-se o comportamento linear na faixa de pulso do medidor taxa de contagem até aproximadamente a tensão de saída de 5Vcc, coincidindo com os apresentados nos figuras 8-15 a 8-17 e nas figuras 8-19 até 8-22, feitos pelo sistema de aquisição de dados da placa desenvolvida.

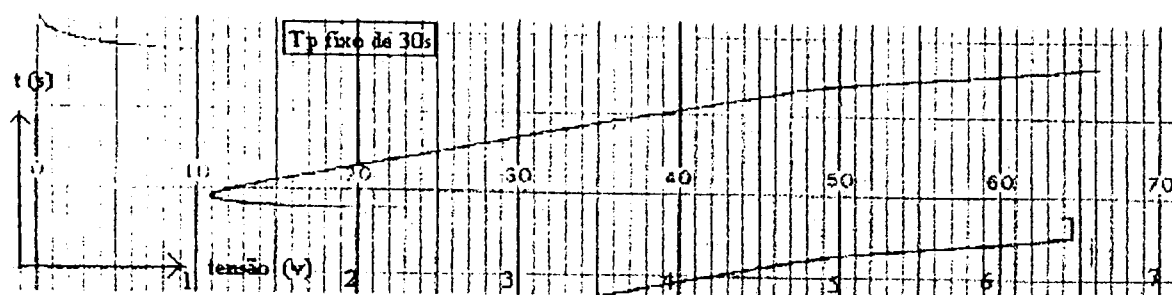


Figura 8-23 Curva obtida pelo registrador gráfico da mesa de controle

Tabela 8-13 Comparação entre os valores de tensão prevista e a obtida para um dado período.

Período gerado (s)	Tensão de saída prevista (v)	Tensão de saída obtida (v)	Desvio (%)
30	1,81	2,03	-12
25	2,00	2,20	-10
20	2,27	2,45	-7,9
15	2,72	2,86	-5,1
12	3,18	3,28	-3,1
10	3,63	3,70	-1,9
7	4,80	4,81	-0,2
4	7,73	7,68	0,6

Estes valores estão apresentados na figura 8-24 conforme se pode observar, embora o valor para períodos longos 30s, apresentem um desvio de tensão, da ordem de 12% em relação ao valor medido, a mesmas consideração anteriormente efetuadas são validas para esta tabela 8-13. Vide comentários antes da figura 8-16.

A figura 8-24 apresenta os valores comparativos entre a curva tomada como referência e os pontos obtidos em um teste estático na avaliação do medidor de período.

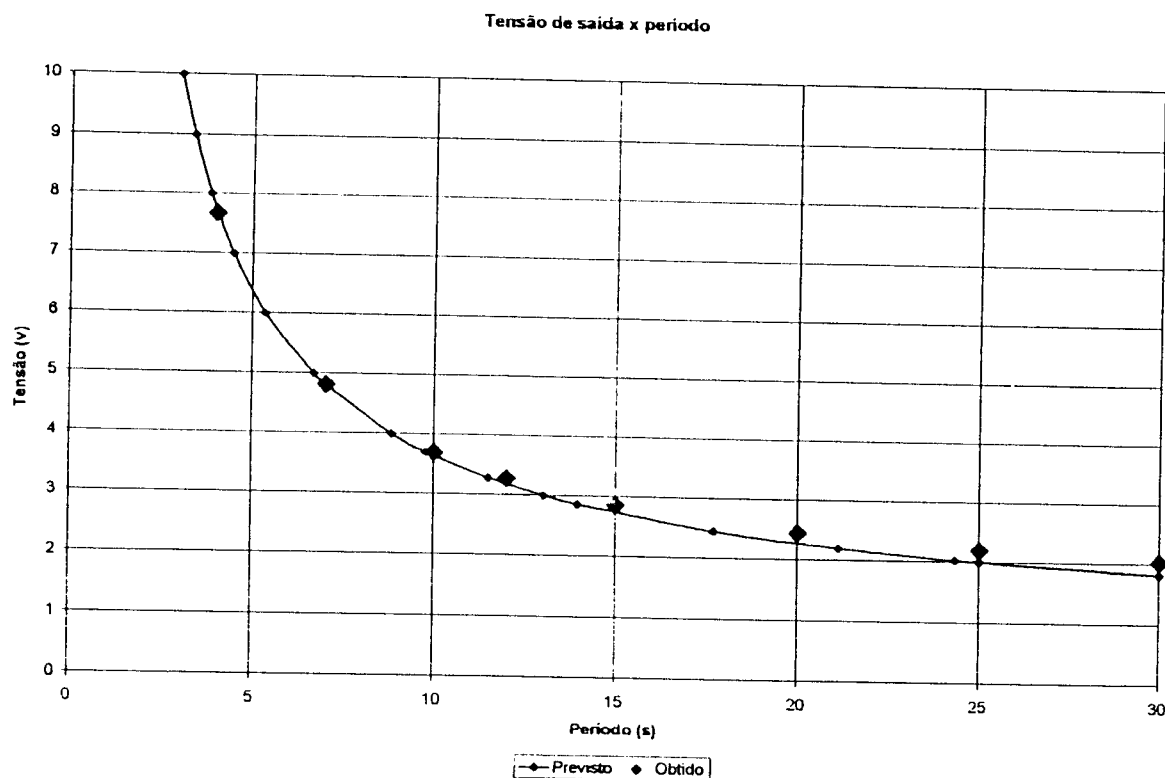


Figura 8-24 Valores comparativos entre a curva tomada como referência e os pontos obtidos em um teste estático na avaliação do medidor de período.

Na figura 8-25 apresentamos os resultados obtidos ao se verificar o valor apresentado no indicador (mostrador) da mesa de controle e a tensão de saída no medidor de período.

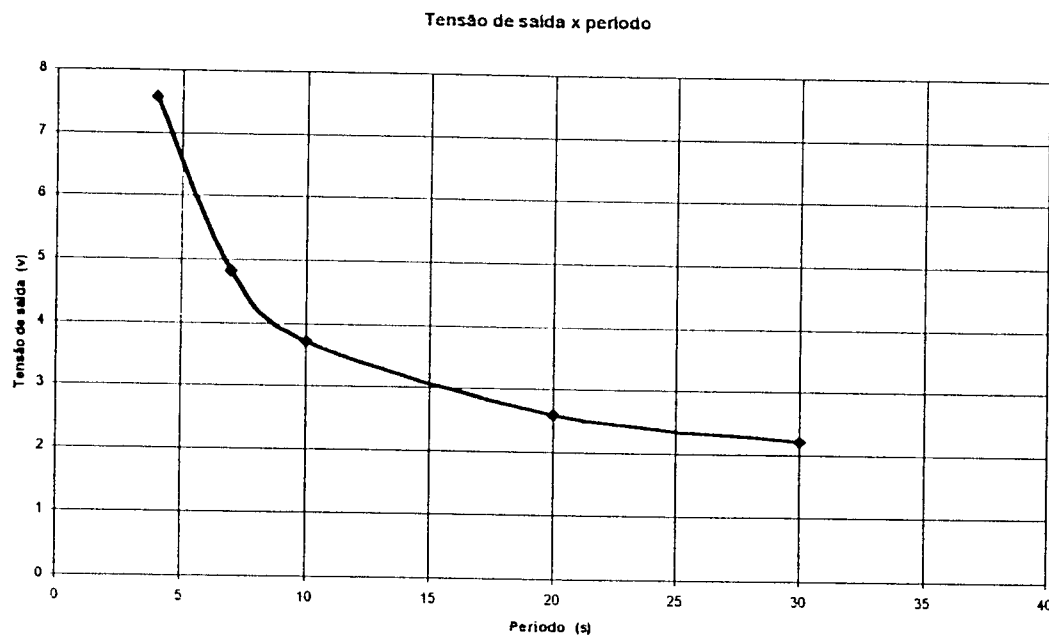


Figura 8-25 Resultados obtidos na saída do medidor de período e o valor apresentado no indicador da mesa de controle.

Estes valores de períodos foram ajustados de forma que o indicador apresenta os valores exatos indicados na figura. Observa-se o comportamento exponencial dos valores apresentados no indicador (mostrador) do período existente na mesa de controle e a tensão de saída para os pontos assinalados na figura 8-25. A falta do ponto de 15s dificultou um melhor ajuste da curva hiperbólica, porém observa uma boa concordância entre os valores anteriormente obtidos

9. ANÁLISE DE ERROS

A análise dos erros aqui efetuada consiste na verificação dos desvios ocorridos na entrada do cartão desenvolvido, dos desvios obtidos na sua saída, e nos dados obtidos dos experimentos no reator.

Pelos dados obtidos da tabela 8-2 Teste da entrada para pulsos, a leitura de erro percentual (erro%) para entrada de pulso com frequência de 1Hz, apresentou um erro de 3,42% devido ao baixo intervalo de tempo utilizado (5,18s). Para as demais entradas os valores estiveram bons, abaixo de 1%, exceção feita ao primeiro ponto da tabela.

Pode ocorrer, em qualquer das medidas efetuadas pelo sistema de aquisição de dados, que o contador venha a acrescentar um pulso à sua contagem o que poderá se constituir em percentual significativo conforme a medida.

Na geração dos sinais isto não ocorre, pois não há a geração de um pulso a mais do que o previsto, considerando que a frequência gerada

possui sempre o mesmo valor, para um mesmo intervalo de tempo e um dado valor de T_r .

O sinal obtido na saída do gerador sofre a ação de dois contadores (divisores).

A frequência de entrada medida foi de 9993915,0Hz. Esta frequência, é dividida pelo primeiro contador 0 (divisor), embora este possa sofrer um “*by-pass*”, ele possui no *software* desenvolvido, como menor divisor, o valor 2 e que pode chegar até o valor “FF” em hexadecimal. Desta forma supondo que este contador possua o valor 2, a frequência na sua saída será de 4996957,5Hz. A seguir esta frequência é levada a um segundo contador 1 (divisor) que dividirá esta frequência por um valor que poderá variar de 2 até “FF” em hexadecimal. Como estes contadores só podem possuir valores inteiros, a frequência de saída poderá ter um dos valores indicados na tabela 9-1.

Tabela 9-1 Valores de frequências de saída obtidos quando se aplica valores inteiros ao contador 1

Valor carregado no contador 1	Frequência de saída (Hz)	Desvio de descontinuidade (%)
16	312.309,8	-
17	293.938,7	6,25
18	277.608,8	5,88
19	262.997,8	5,56
20	249.847,9	5,26
21	237.950,4	5,00
22	227.134,4	4,76
23	217.259,0	4,55
24	208.206,6	4,35
25	199.878,3	4,17
26	192.190,7	4,00
27	185.072,5	3,85
34	146.969,3	3,03
35	142.770,2	2,94
49	101.978,7	2,08
50	99.939,2	2,04
51	97.979,6	2,00
52	96.095,3	1,96
67	74.581,5	1,52
68	73.484,7	1,49
100	49.969,6	1,01
101	49.474,8	1,00
102	48.989,8	0,99

Estes valores foram obtidos quando se aplicou a sua entrada a frequência de 4996957,5Hz.

Desta forma nota-se que quando o contador 1 é carregado com o valor 16, o circuito apresenta uma frequência na saída do gerador de 312309,8Hz. Se o contador 1 possuir o valor 17 se terá o valor de 293938,7Hz, portanto um salto de 6,25%. Não há como gerar uma frequência

intermediária entre 293938 e 312309,8Hz. Porém com a diminuição da frequência, o desvio também vai diminuindo, de tal forma que, para as baixas frequências, este erro se aproxima de zero. Por exemplo, para obter-se a frequência de 10Hz pode ser feito da seguinte forma:

$$9993915/160 = 62462\text{Hz}$$

onde 160 é o valor utilizado pelo contador 0 e 62462 será a frequência de saída deste contador.

Se a seguir fizer-se

$$62462/6246 = 10,0003\text{Hz}$$

onde 6246,2 é o valor utilizado pelo contador 1 teremos a frequência de 10,0003Hz na saída do segundo contador, frequência esta que também estaria disponível na saída do gerador. Se o valor 6246 fosse diminuído de uma unidade, isto é, $6246 - 1 = 6245$ e dividirmos a frequência de saída do contador 0 que é de 62462Hz por este valor, teríamos um salto em frequência de $62462/6245 = 10,002\text{Hz}$, desta forma observa-se que o salto em frequência ocorrido para baixas frequências foi de 0,017%, bastante inferior aos valores obtidos para as altas frequências.

Desta forma, observamos que para as alta frequências, o comportamento do *hardware* desenvolvido, apresenta grandes saltos de frequências. Isto, deve-se às características dos circuitos utilizados.

No futuro poderá ser efetuadas alterações no *software* de forma a que o contador 0 sofra um “*by-pass*” e se o contador 1 for dividido por 32, obteremos metade do erro. Além disso, com a utilização de componentes dedicados que trabalhem com frequências de entrada mais elevada, estes valores podem ser melhorados para as altas frequências.

Porém como temos interesse em frequências que vão até 150KHz, tem-se um desvio, conforme a tabela, de 2 à 3% no final da faixa, o que para uma avaliação do canal de partida e do período são valores aceitáveis uma vez que o manual da mesa de controle do reator apresenta um desvio para o medidor de taxa de contagem de $\pm 1,5\%$ e o medidor de período, geralmente apresenta um desvio aceitável de até 5%. Porém em alguns casos, um desvio de 10% no início da faixa do medidor de período também pode ser aceitável já que normalmente o valor do "set point" de período é ajustado para um valor bastante conservativo de forma a prever possíveis desvios.

Com relação ao sistema de aquisição de dados, suas rotinas foram bastante otimizadas, de forma a priorizar a rotina de geração de pulsos exponenciais.

Desta forma, optou-se por estabelecer apenas dois níveis de temporização para o sistema de aquisição de dados, 0,98s e 0,197s. Isto levou a um aumento dos desvios para baixas frequências principalmente no intervalo de 1 à 10Hz, porém como na avaliação do canal de partida o interesse se concentra na faixa de 10Hz à 150KHz, o desvio apresentado pode ser aceitável. Destaque-se ainda que, conforme mostrado na tabela 8-10 para a frequência de 20Hz, o desvio na frequência lida, já se encontra em 5%.

Desta forma, para as frequências próximas de 200KHz, mesmo que o algoritmo calcule valores intermediários, não poderão ser gerados, conforme comentado na tabela 9-1, em função das limitações do *hardware/software*. Logo, para uma frequência do gerador de 100KHz o salto de frequência é de aproximadamente 2%.

Foi implementado nos testes da segunda fase, a mudança automática de escala. Desta forma o sistema de aquisição de dados poderá operar até a frequência de 330KHz, ocorrendo a mudança de escala quando a frequência ultrapassar o valor de 50KHz, e com um desvio inferior a 0,1% para frequências acima de 1kHz, conforme mostrado na tabela 8-10.

Destaque-se que o erro ali apresentado é o erro máximo, e como já comentado a faixa de interesse será acima dos 10Hz e até as frequências de 100KHz, 150KHz, os valores obtidos pelo sistema de aquisição de dados são satisfatórios.

Comparando os dados da tabela 8-2 para 1Hz e os dados obtidos na segunda fase observa-se uma grande discrepância. Isto se deve ao fato de que na primeira fase, o sistema de aquisição de dados (temporizador dos contadores) foi ajustado para um intervalo de tempo suficiente para que o número de contagens fosse alto, de forma que o acréscimo de 1 contagem não levasse a um grande desvio e na segunda fase em função da otimização das rotinas do *software*, e que se estabeleceu apenas dois valores de tempo (0,98s e 0,197s) para permitir que o *software* operasse com maior velocidade privilegiando-se os circuitos de geração de sinais exponenciais.

Os resultados obtidos após a realização da terceira fase de testes, os testes de campo, indicaram que os pulsos gerados na faixa da primeira década até a metade da última década apresentaram um comportamento linear, conforme se verifica pelo exemplo apresentado no registrador gráfico da mesa de controle (figura 8-23) e pelas figuras de 8-15 até 8-22.

Com relação ao medidor de período podemos dizer que para as leituras de tensão acima de 25s este apresentou um desvio de 10% em relação

a curva prevista e para leituras acima de 15s, este desvio caiu para 5,1%, lembrando que para o valor de "*set point*" de desligamento (12) e o desvio em tensão foi de 3,1%.

O maior desvio, 12% verificou-se para o valor de Tr de 30s (tabela 8-13), porém conforme já mencionado, este desvio em tensão acima de 30s não compromete a segurança do reator, pois as medidas que se aproximam dos valores de "*set point*" de desligamento, vão se reduzindo (tabela 8-13).

Desta forma acreditamos que os dados obtidos atualmente melhoraram a precisão das medidas anteriores principalmente no início da escala do indicador de período.

Não foram observadas diferenças durante a monitoração dos pulsos na saída para contador com os pulsos aplicados na entrada, como era esperado, conforme apresentado na tabela 8-11.

10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos das tabelas e gráficos levantados em bancada na primeira fase indicam que o cartão desenvolvido atende as especificações propostas, gerando pulsos e adquirindo sinais de forma adequadas para uma análise do canal de partida de um reator como o utilizado na reator IEA-R1m

Para a avaliação do período de um canal de partida, um erro de 3, ou 4% no ponto de desligamento do reator pode ser aceitável desde que o ajuste seja feito de forma conservativa, oferecendo uma margem para estes desvios.

Os resultados obtidos pelo gerador existente no cartão projetado estão bons, permitindo a geração de frequências exatas o que permite a obtenção de uma curva bastante próxima à uma função exponencial, como desejado neste trabalho.

Os valores obtidos na entrada de pulsos estão adequados e permitem uma boa medida da taxa de contagem de modo a se efetuar uma comparação com os valores obtidos dos circuitos eletrônicos da mesa de controle.

Pelos resultados apresentados na segunda fase, a fase de integração do *hardware* com o *software*, nota-se, que a função exponencial gerada possui uma boa aproximação quando comparada com uma função exponencial teórica, conforme antecipado na primeira fase.

Pela análise dos resultados obtidos com a simulação de vários transientes, gerando funções exponenciais, todas apresentaram um desvio máximo de 3% (tabelas 8-6 a 8-9), o que representa um bom valor, levando-se em conta as características do *hardware* desenvolvido, que, apesar de simples, possui uma versatilidade tal que permite que se desenvolva no futuro, um novo *software*, que em fornecendo os parâmetros da equação de reatividade para um dado reator, se possa simular o comportamento do canal de partida, simulando os sinais gerados pelo detector sob várias condições, inclusive nos casos de acidentes postulados, utilizando-se a equação 4-16 e em /16/, representa o comportamento do reator a partir da instante inicial do transiente e não apenas a condição assintótica, quando apenas um termo esta presente, conforme foi assumido nestes trabalho.

$$\phi_T(t) = \phi_{T0}(A_0 e^{(\omega_0 t)} + A_1 e^{(\omega_1 t)} + \dots + A_6 e^{(\omega_6 t)})$$

Entrando no programa com os valores de A_i e os diversos ω_i é possível obter uma função equivalente a que se obteria se o reator estivesse operando nestas condições, ou seja, simulando uma condição mais próxima de um reator nuclear, podendo condições de acidentes para um dado reator.

Os testes demonstraram que o cartão e os *softwares* desenvolvidos operaram de modo correto, permitindo a simulação de sinais que permitirão uma avaliação do canal de partida na faixa de pulso, desde a primeira década até a sua última década de pulso.

Na terceira fase de testes quando se conectou o cartão à mesa de controle do reator IEA-R1, os resultados obtidos foram satisfatórios. Os sinais gerados apresentaram um comportamento como previsto nos testes anteriores e os circuitos da mesa de controle puderam ser testados com um sinal de comportamento exponencial de período constante. Os sinais obtidos da mesa de controle foram salvos em disco e posteriormente analisados com o auxílio de uma planilha eletrônica, cujos resultados são as figuras 8-14 até 8-22 e concomitantemente avaliou o desempenho dos indicadores e circuitos eletrônicos do canal de partida da mesa de controle, e pelos resultados obtidos nota-se que a instrumentação apresentou boa linearidade até a metade da última década.

Após a realização dos testes de campo verificou-se na última década de operação do canal de partida, um desvio certamente causado pela influência do canal Campbell. Deverão ser programados novos testes e análises com dados obtidos com outros profissionais especialistas neste tipo de canal.

Alguns "*set points*" de ajuste da mesa de controle puderam, como previsto ser avaliados, como por exemplo o "*set point*" de desligamento ajustado em 12s, o que efetivamente ocorreu. Ao se gerar uma curva simulando um período (T_r) de 12s ocorreu o desligamento do reator pela ação do medidor de período, e quando se estabeleceu um valor de 10s para T_r , este ocorria quando o indicador do instrumento ultrapassava a marca de 12s.

Outro ajuste de "*set point*" verificado foi o do indicador de baixa taxa de contagem (Low Count Rate) que mantinha o reator desligado quando a frequência de entrada era inferior a 5Hz.

Alguns dos objetivos propostos para este cartão não foram atendidos pois apresentaram problemas relacionados com a obtenção de alguns sinais como por exemplo na medida do tempo de resposta a um salto de frequência.

Ao se tentar realizar este teste os tempos de aquisição do sistema de aquisição de dados se mostraram insuficientes. A tabela obtida ficaria incompleta, o que dificultaria a análise dos dados obtidos.

Desta forma não foi possível a sua medida porém alterações no cartão estão programadas e deverão atender a este item. Sendo mais uma opção para se medir o tempo de resposta do canal de partida do reator além do método que atualmente é utilizado para este propósito.

Concluindo, podemos afirmar que o conjunto cartão/*software* desenvolvido operou de modo satisfatório não se observando problemas eletrônicos durante a realização dos testes de campo.

Destaque-se que como era de se esperar em função da tecnologia digital adotada, o gerador apresentou durante os testes, grande estabilidade, reproduzindo sempre as mesmas frequências quando os intervalos de tempos eram repetidos.

Como proposta para futuros desenvolvimentos, está o da incorporação de uma algoritmo que gere a função descrita em 4-16 permitindo a verificação da performance de reatores e pode ser o ponto de partida para o desenvolvimento de um simulador para instrumentação de mesas de controle, com a introdução de circuitos que gerem corrente contínua, simulando a

operação de detectores na faixa de potência, onde o sinal de saída, é em corrente continua.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo **Manual de Operação do SAD IEA-R1** julho 1998 pág. 31 Documento Número R2210-3121-HO-01/00.
02. COOKE-YARBOROUGH, E. H. PULSFORD, E.W **An Accurate Logarithmic Counting-Rate Meter Covering A Wide Range** The Proceeding of The Institution of Electrical Engineers pág. 196 part II vol 98 1951.
03. COOKE-YARBOROUGH, E. H. PULSFORD, E.W **A Counting-Rate Meter Of High Accuracy** The Proceeding of The Institution of Electrical Engineers pág. 191 part II vol 98 1951.
04. DuBRIDGE, R. A., **Campbell Theorem - System Concepts And Results** IEEE Transaction On Nuclear Science V14 N1 pág. 241-246 Fevereiro 1967.
05. DUDERSTADT, James J. and HAMILTON, Louis J. **Nuclear Reactor Analysis** John Wiley & Sons, Inc 1976
06. EGGBRECHT, Lewis C. **Interfacing To The IBM Personal Computer** Howard w. Sams & co., Inc. 1985.

07. EVANS, R. D. **The Atomic Nucleus** McGraw Hill 1955.
08. GLASSTONE Samuel e SESONSKE Alexander **Engenharia de Reactores Nucleares** Editorial Reverté S.A. edición en español 1975.
09. HARRER, Joseph M. and BECKERLEY, James G. **Nuclear Power Reactor Instrumentation Systems Handbook**, 1973 volume 1.
10. HOGE, R. R. and NIEHAUS, D. J. **Transistorized Reactor Instrumentation and Protective Circuits** IRE Transaction on Nuclear Science. Junho 1959.
11. INTRATOR Edmond **Canal Logaritmo E Medidor De Período Transistorizado Para O Reator Argonauta** Instituto de Engenharia Nuclear - CNEN Junho 1969.
12. JOURDAIN, Robert e The Peter Norton Computing Group **PC Guia do Programador Soluções e problemas** Editora Campus Ltda 1993.
13. KEEFE, D. J., MCDOWELL, W.P. and RUSCH, G. K. **Microprocessor Controlled Digital Período Meter** IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. NS-27, No. 1, Fevereiro 1980.
14. KNOLL, GLENN F. **Radiation Detection And Measurement** John Wiley & Sons, Inc. 2o Edição 1989.
15. KOWALSKI, E **Nuclear Eletronics** Berlin Springer 1970.

16. LAMARSH, John R. **Introduction to Nuclear Reactor Theory** Addison-Welley Publishing company, 1972 2º edição.
17. LAMARSH, John R. **Introduction to Nuclear Engineering** Addison-Welley Publishing company, 1977 3º impressão.
18. NICHOLSON, P. W. **Nuclear Electronics** John Wiley & Sons Ltda 1974.
19. **MANUAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DO REATOR IEA-R1 Instrumentation System - Operation And Maintenance Manual** General Atomic Company Março 1975.
20. MENDONÇA, Alexandre, ZELENOVSKY, Ricardo, **PC e Periféricos Um Guia Completo de Programação** Editora Ciência Moderna Ltda 1996.
21. MILLMAN, Jacob, HALKIAS, Christos C. **Eletrônica Dispositivos e Circuitos** Volumes 1 e 2 McGraw Hill do Brasil 1981.
22. MILLMAN, Jacob TAUB, Herbert **Pulse and Digital Circuits** McGraw-Hill Book Company Inc, 1956.
23. MURRAY, Raymod. L. **Engenharia Nuclear** 1963 R.J. Brasil.
24. PERTECE Junior, Antonio **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos Teoria, Projetos, Aplicações e Laboratório** 3a Edição McGraw-Hill, Ltda 1990.

25. PLAIGE, Y., QUENEE, R. **Use Of Campbell's Method In Nuclear Reactor Control Instrumentation** IEEE Transaction On Nuclear Science V14 N1 pág. 241-246 Fevereiro 1967.
26. PRICE, William J. **Nuclear Radiation Detection** McGraw-Hill Book Company Inc, 1958.
27. PONTES, Eduardo W. **Análise de Sistemas de medição de fluxo de Neutrons Utilizando Funções Estatísticas** Tese de doutoramento IPEN 1997.
28. RUTKOWSKI George B. **Handbook of Integrated-Circuit Operational Amplifiers** Prentice-Hall Inc 1975.
29. SCHULTZ, M. A. **Control of Nuclear Reactor and Power Plants** McGraw-Hill Book Company, 1961 2º edição.
30. STEPHENSON, Richard **Introduction to Nuclear Engineering** McGraw-Hill Book Company, Inc 1954.
31. THOMAS, Roland E. , ROSA, Albert J. **Circuits And Signal. An Introduction to Linear And Interface Circuitos** John Wiley & Sans 1984.
32. THOMAS, Stan **N-Decade Count-Rate-Meter With Automatic Scale Change Feature And Resolution Of One Decade** IEEE Transaction on Nuclear Science Janeiro 1963.

33. TOMPKINS, Willis J. and WEBSTER, John G. **Interfacing Sensors To The IBM^R PC** Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 1988
34. TRIEBEL, Walter A., SINGH, Avtar **The 8088 And 8086 Microprocessors Programming, Interfacing, Software, Hardware, And Aplications** Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey Columbus, Ohio Segunda edição 1997.
35. WADE, E.J. and DAVIDSON, D.S. **Transistorized Log-Period Amplifier** IRE Transaction on Nuclear Science pág 53 Junho 1959.
36. ZOLINGEN, J. J. van IIIA. **The Monitoring of Low Neutron Flux By Means of Fast Pulse-Couting Channels** Philips Technical Review Volume 21 1959/60 No. 4/5.

12- ANEXOS

12-1 Lista de materiais

Tabela 12-1 – Lista de materiais

REFERÊNCIA	CIRCUITO INTEGRADO
U1	TL 081
U2	LM331
U3	LF411A
U4	GN137
U5	TL081
U6	LM331
U7	LF411A
U8	GN137
U9	82C54
U10	74C57
U11	82C54
U12	GN137
U13	74HC10
U14	74HC00
U15	74HC00
U16	74HC00
U17	74HC00
U18	74HC08
U19	74CS688
U20	74CS245
U21	74LS244
U22	74LS138
U23	8255A
U24	82654-2
U25	74HC330
U26	74LS221
U27	82C54
U28	74HC10
U29	74HC00
U30	74HC00

U31	74HV00
U32	74HC14
U33	GN137
U34	74HC08
U35	74HC00
U36	74HC00
U37	74HC02
U38	ISOLADOR
U39	ISOLADOR
U40	ISOLADOR
U41	78L05

REFERÊNCIA	RESISTORES
R1	100 k Ω
R2	10 k Ω
R3	10 k Ω
R4	5 k Ω
R5	20 k Ω
R6	200 k Ω
R7	100 k Ω
R8	10 k Ω
R9	10 k Ω
R10	5 k Ω
R11	TRIMIT 2 k Ω
R12	6,8 k Ω
R13	10 k Ω
R14	TRIMIT 1 M Ω
R15	1 M Ω
R16	100 k Ω
R17	1 k Ω
R18	1,5 k Ω
R19	470 Ω
R20	2,2 k Ω
R21	10 k Ω
R22	10 k Ω
R23	5 k Ω
R24	20 k Ω MF.
R25	20 k Ω M.F.
R26	100 k Ω 1%
R27	5 k Ω 1%

R28	TRIMIT 2 k Ω
R29	10 k Ω
R30	10 k Ω
R31	6 K8
R32	2,2 k Ω
R33	10 k Ω
R34	1,5 k Ω
R35	TRIMIT 1 M Ω
R36	1 M Ω
R37	100 k Ω
R38	1 k Ω
R39	470 Ω
R40	1 k Ω
R41	47 Ω
R42	220 Ω
R43	470 Ω
R44	10 k Ω
R45	10 k Ω
R46	10 k Ω
R47	10 k Ω
R48	10 k Ω
R49	1 M Ω
R50	1 M Ω
R51	470 Ω
R52	390 Ω
R53	1,43 k Ω 1%
R54	2,87 k Ω
R55	7,142 k Ω 1%
R56	2,857 k Ω 1%
R57	TRIMIT 2 k Ω
R58	1 k Ω
R59	1 k Ω
R60	47 Ω
R61	100 k Ω

REFERÊNCIA	DIODOS
D1	IN 4148
D2	IN 4148
D3	IN 4002
D4	IN 4148

D5	IN 4148
D6	IN 4001

REFERÊNCIA	TRANSITORES
T1	2N222A
T2	2N222A
T3	2N222A

REFERÊNCIA	FUSÍVEL
F1	250mA

REFERÊNCIA	CAPACITORES
C1	100 kpF
C2	100 kpF
C3	100 kpF
C4	1 K pF
C5	470 pF
C6	330 pF
C7	100 kpF
C8	100 kpF
C9	100 kpF
C10	100 kpF
C11	100 kpF
C12	100 kpF
C13	1 kpF
C14	470 pF
C15	330 pF
C16	100 kpF
C17	100 kpF
C18	100 kpF
C19	1 kpF
C20	1 kpF
C21	100 kpF
C22	100 kpF
C23	100 kpF
C24	100 pF
C25	100 kpF
C26	100 kpF
C27	100 kpF
C28	100 kpF
C29	100 kpF
C30	100 kpF

C31	100 pF
C32	33 pF
C33	33 pF
C34	100 k μ F
C35	100 k μ F
C36	100 pF
C37	100 pF
C38	100 μ F
C39	100 μ F
C40	100 k μ F
C41	100 k μ F
C42	100 k μ F
C43	100 k μ F
C44	100 k μ F
C45	100 k μ F
C46	100 k μ F
C47	100 k μ F
C48	100 k μ F
C49	100 k μ F
C50	100 k μ F
C51	100 k μ F
C52	100 k μ F
C53	100 k μ F
C54	100 k μ F
C55	100 k μ F
C56	100 k μ F
C57	100 k μ F
C58	100 k μ F
C59	100 k μ F
C60	100 k μ F
C61	100 k μ F
C62	100 k μ F
C63	100 pF
C64	100 pF
C65	100 pF
C66	100 pF
C67	100 pF
C68	100 k μ F
C69	100 k μ F
C70	100 k μ F
C71	100 k μ F
C72	100 k μ F

12-2 – Circuito Elétrico do Protótipo Desenvolvido

