

**MARINHA DO BRASIL**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK**  
**CAIO THEBERGE LIMA LEITÃO**



**Técnica Digital para Indicação de Posição das Barras de Controle do**  
**LABGENE**

**RIO DE JANEIRO**  
**2018**

**MARINHA DO BRASIL**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK**  
**CAIO THEBERGE LIMA LEITÃO**

**Técnica Digital para Indicação de Posição das Barras de Controle do**  
**LABGENE**

**Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk para obtenção do diploma do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear para Oficiais da Marinha do Brasil.**

**RIO DE JANEIRO**

**2018**

**MARINHA DO BRASIL**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK**  
**CAIO THEBERGE LIMA LEITÃO**

**Técnica Digital para Indicação de Posição das Barras de Controle do**  
**LABGENE**

**Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Wandenkolk para obtenção do diploma do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear para Oficiais da Marinha do Brasil.**

**Área de concentração: Tecnologia Nuclear**

**Orientador (a): CC (EN) Alexandre Fonseca Pova da Silva**

**RIO DE JANEIRO**  
**2018**

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo invisível toque do destino, que se faz notar ao fechar os maus caminhos e abrir novos rumos de esperança e aprendizado.

A minha família pela fé em mim depositada, pelo amor em todos os momentos e pela compreensão das minhas decisões e da distância que nos separa.

Ao Exmo. Sr. Contra-Almirante (EN) Ferreira Marques e ao Sr. CF (EN) André Ricardo pela brilhante condução do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Tecnologia Nuclear, exercida com dedicação, organização e preocupação com a capacitação dos oficiais-alunos e com as demandas presentes e futuras da Marinha do Brasil.

Ao Sr. CC (EN) Alexandre Fonseca Póvoa da Silva, meu orientador e encarregado de estágio, por sua completa disponibilidade e incondicional apoio em todas as etapas do processo de criação desta monografia.

A todos os instrutores do curso pelo esforço em ter transmitido o conhecimento e experiências profissionais que hoje integram o meu rol de formação.

A todos que promoveram, incentivaram e tornaram possível a realização deste curso. Incluem-se aqui: o Exmo. Sr. Contra-Almirante Henrique Baptista, coordenadores do curso e demais facilitadores afetos à área de pós-graduação do Centro de Instrução Almirante Wandenkolk.

Aos colegas de curso CT Luiz Iotty, CT Vilalva, 1T Lauria, 1T Christian, 1T Augusto Ferreira, 1T Moura Simões e 1T (QC-CA) Bruno Nascimento pelo companheirismo e pela união no enfrentamento dos desafios do curso.

Aos amigos, dentro e fora da marinha, pelo espelho do caráter, pela opinião, conselho, ensinamento e exemplo os quais auxiliaram e facilitaram de alguma forma meu progresso neste curso.

## RESUMO

Neste trabalho propõe-se uma solução digital para indicar o posicionamento das barras de controles do reator do LABGENE, a ser montado no Reator Nuclear no Centro Experimental Aramar, em Iperó/SP. Tal proposta consiste na elaboração de um circuito eletrônico virtual, composto por componentes comerciais, cujo funcionamento e resultados são baseados em simulação no programa ISIS PROTEUS. Ademais, a proposta contextualiza com o estado da arte da automação e com as normas nucleares em vigor. A metodologia para a concretização do objetivo deste trabalho divide-se, portanto, em duas etapas: montagem do circuito e simulação dos parâmetros do circuito eletrônico. Este circuito tem como importantes características: alta imunidade à ruído, alta confiabilidade típica dos processos nucleares e a simplicidade dos componentes envolvidos que facilitam a identificação de inconformidades.

**Palavras-chave:** Nuclear, Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha, Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, Marinha do Brasil.

## ABSTRACT

In this paper it is proposed a digital solution to indicate the position of the control rods of the LABGENE's reactor control rods, to be mounted at the Aramar's Experimental Center in Iperó/SP. This proposal consists in the elaboration of a virtual electronic circuit, composed of commercial components, whose operation and results are based on simulation in the program ISIS PROTEUS. In addition, the proposal deals with the state of the art of automation and with the nuclear regulations in force. The methodology developed to achieve the objectives of this work is divided into two stages: circuit assembly and simulation of electronic circuit parameters. This circuit has as important characteristics: high noise immunity, the high reliability of nuclear processes and the simplicity of the components involved that facilitate the identification of nonconformities.

**Keywords:** Nuclear, Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha, Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, Marinha do Brasil.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática da reação em cadeia.....	19
Figura 2 – Seção de Choque do Urânio 235.....	21
Figura 3 – Fórmula dos seis fatores.....	23
Figura 4 – Operação de um reator PWR.....	25
Figura 5 – Sistema de movimentação de barras de controle eletromecânico.....	26
Figura 6 – Sistema de indicação da posição das barras de controle.....	28
Figura 7 – Circuito divisor de tensão da “Reed Switch”.....	29
Figura 8 – Magnetização da “Reed Switch” pelo ímã permanente.....	30
Figura 9 – Tipos de filtragem.....	32
Figura 10 – Topologia de um filtro passa-baixa.....	33
Figura 11 – Diagrama de Bode de um filtro passa-baixa.....	34
Figura 12 – Flip-Flop assíncrono.....	35
Figura 13 – Contagem de clocks.....	36
Figura 14 – Contador síncrono.....	37
Figura 15 - Topologia básica de um multiplexador.....	38
Figura 16 – Conversor tensão em frequência.....	39
Figura 17 – Modelos básicos do RS-485.....	40
Figura 18 – Figura 18 – interligação dos componentes do circuito de indicação de posição das barras de controle.....	42
Figura 19 – Bloco Funcional do Multiplexador ISL718131EH.....	46
Figura 20 – Configuração do LM331 como conversor de precisão de tensão em frequência.....	48
Figura 21 – Configuração de Pinos do DS16F95QML.....	49
Figura 22 – Configuração de pinos do M54HC590.....	49
Figura 23 – Fluxograma dos processos do circuito.....	50
Figura 24 – Circuito de instrumentação e filtragem.....	51
Figura 25 – Circuito do Multiplexador.....	54
Figura 26 – Circuito de conversão, transmissão e interface homem-máquina.....	56
Figura 27 – Resultados da filtragem dos sinais ROD7 e ROD1.....	57

Figura 28 – Resultados da Multiplexação.....	58
Figura 29 – Sinal de saída da conversão tensão-frequência.....	59
Figura 30 – Visão aproximada da forma de onda.....	60
Figura 31 – Transmissão de pulsos pelo RS-485.....	64



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico Tensão x Frequência da simulação.....	62
Gráfico 2 – Comparação entre a simulação e equação do modelo real.....	63
Gráfico 3 – Relação da posição da barra com a frequência.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais elementos do Reator PWR.....	24
Tabela 2.2 – Tabela do Flip-Flop JK.....	37
Tabela 2.3 – Contagem de pulsos de um contador síncrono.....	38
Tabela 3.1 – Características da chave magnética modelo HSR-196W.....	44
Tabela 3.2 – Condição normal de operação.....	45
Tabela 3.3 – Condição de acidente.....	45
Tabela 3.4 – Características do sensor.....	45
Tabela 3.5 – Sinais de tensão das barras de controle.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSI – *American National Standards Institute* (Instituto Nacional Americano de Padrões)

CLP – Controlador Lógico Programável

CTMSP – Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo

CRDS – *Control Rod Drive System* (Sistema de Controle de Posição das Barras)

IAEA – *International Atomic Energy Agency* (Agência Internacional de Energia Atômica)

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

LABGENE – Laboratório de Geração de Energia Nucleoelétrica

NRC – *Nuclear Regulatory Commission* (Comissão Nuclear Regulatória)

PWR – *Pressurized Water Reactor* (Reator de Água Pressurizada)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Omega$  - *Ohm* (unidade para medir resistência)  
A/D – Analógico-Digital  
°C – *Celsius* (unidade para medir temperatura)  
D/A – Digital Analógico  
CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
dB – Decibel  
eV – elétron-Volt (unidade para medir energia)  
F – *Faraday* (unidade para medir capacitância)  
F<sub>c</sub> – Frequência de Corte  
F<sub>out</sub> – Frequência de saída  
Hz - Hertz  
I – *Input* (Entrada)  
IHM – Interface Homem-Máquina  
O – *Output* (Saída)  
PB – Posição da barra  
R – *Reset* (Reinicialização)  
rad – unidade de medida de radiação  
SN – *Step Number* (Número de passos)  
V – Tensão  
V<sub>in</sub> – Tensão de entrada no divisor de tensão  
V<sub>2in</sub> – Tensão de entrada no conversor V/F  
Watt – Unidade para medir potência

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	15
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4 METODOLOGIA.....	17
1.5 ESTRUTURA DO TCC.....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>18</b>
2.1 CONCEITOS DE FÍSICA NUCLEAR.....	18
2.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UM REATOR NUCLEAR.....	19
<b>2.2.1 Controle e manutenção da reação em cadeia.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.2 Componentes e operação de um reator PWR.....</b>	<b>24</b>
2.3 MECANISMO DE ACIONAMENTO DE BARRAS DE CONTROLE.....	26
2.4 INDICADOR DE POSIÇÃO DAS BARRAS DE CONTROLE.....	27
<b>2.4.1 Chaves magnéticas.....</b>	<b>29</b>
2.5 CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAIS.....	31
<b>2.5.1 Filtros elétricos.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5.2 Contadores.....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.3 Multiplexadores.....</b>	<b>38</b>
<b>2.5.4 Conversor de tensão em frequência.....</b>	<b>39</b>
<b>2.5.6 Interface RS 485.....</b>	<b>40</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO.....	42
<b>3.1.1 Sensores IPMAB.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1.2 Filtros passa-baixa.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.3 Multiplexador ISL71831SEH.....</b>	<b>46</b>
<b>3.1.4 LM331.....</b>	<b>47</b>
<b>3.1.5 RS-485 DS16F95QML.....</b>	<b>48</b>

<b>3.1.6 Contador assíncrono M54HC590.....</b>	<b>49</b>
3.2 MONTAGEM DO CIRCUITO.....	50
<b>3.2.1 Instrumentação e Filtragem.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2.2 Multiplexação.....</b>	<b>53</b>
<b>3.3 Conversão em frequência e transmissão.....</b>	<b>55</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>56</b>
4.1 RESULTADOS DA FILTRAGEM.....	56
4.2 RESULTADOS DA MULTIPLEXAÇÃO.....	57
4.3 RESULTADOS DA CONVERSÃO TENSÃO-FREQUÊNCIA.....	58
4.4 RESULTADOS DA TRANSMISSÃO PELO RS-485.....	63
4.5 RELAÇÃO ENTRE POSIÇÃO E A LEITURA DE FREQUÊNCIA.....	65
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indicação da posição das barras de controle é um dos processos mais sensíveis para o controle e a segurança da operação de um reator nuclear, visto que, o nível de inserção das barras está diretamente associado ao controle de temperatura, potência, e, conseqüentemente, geração de energia, tanto em regime transitório, na elevação da potência de operação, quanto em regime estacionário, na manutenção dos níveis normais de operação [1]. Logo, a informação que o sistema de indicação do posicionamento das barras de controle apresenta para o operador do sistema e para o sistema de controle deve ser extremamente confiável, caso contrário, resultará em prejuízos para a operação e para a segurança da instalação nuclear.

O sistema de indicação de posição de barras de controle deve cumprir a função de apresentar, em tempo real, a indicação da posição das barras de controles para o operador do sistema, e, ao mesmo tempo, alimentar o sistema de controle do mecanismo de acionamento das barras com essas informações. Dessa maneira, percebe-se a vitalidade do mesmo para a operação da planta, uma vez que são os “olhos” do sistema de controle, pois uma percepção errada do processo que este controla, pode levar o operador do sistema a tomar atitudes erradas ou a uma atuação indevida do sistema de controle. Ambos os casos podem comprometer a segurança da instalação.

Portanto, a precisão da informação é o objeto de performance mais importante a ser satisfeito pelo indicador de posição das barras de controle. Assim sendo, os mínimos desvios devem ser evitados, pois a confiabilidade deve estar presente nos equipamentos e sistemas nucleares, já que os efeitos negativos de um possível acidente causam imensos prejuízos à sociedade, ao meio ambiente e à política nuclear mundial [1].

Nesse contexto, é preciso inserir dispositivos para que a confiabilidade do indicador da posição das barras de controle seja adequada. Um caminho razoável para se atingir tal proposta é pela utilização de tecnologia digital no processamento da informação medida. Esse entendimento é pacificado até mesmo pelas mais importantes agências reguladoras como a NRC, a IAEA, a IEEE e a ANSI e a Comissão Eletrotécnica Internacional [2]. junto com a IAEA, esta última divulgou mais de 20 publicações

relacionadas à implementação e licenciamento de instrumentação e controle digital (I&C) [2].

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A implementação de técnica digital no processo de indicação da posição das barras de controle e segurança aumenta a segurança da instalação nuclear [3]. Isto ocorre porque a precisão das informações é o principal ponto que afeta seu controle e segurança e, os sistemas digitais possuem vantagem sobre os analógicos, uma vez que estes últimos são mais suscetíveis à interferência eletromagnética, o que afeta o sinal e, conseqüentemente, a informação contida nele.

Além disso, outros fatores tornam os sistemas digitais mais confiáveis, tais como [3]:

- a) Mantêm uma melhor calibração;
- b) Maior capacidade de armazenar a informação e manipular os dados, de modo que isso facilita as condições de operações, pelo fato das suas variáveis poderem ser mais facilmente medidas e apresentadas para o operador.;
- c) Possui melhor desempenho que os sistemas analógicos no que tange a acurácia das informações e no processamento de múltiplas informações.
- d) Possui maior flexibilidade e maior disponibilidade que os sistemas analógicos, ou seja, são menos suscetíveis a falhas que interrompam seu funcionamento;
- e
- e) Possui capacidades adicionais: autodiagnostico de sistema, *self-testing*, validação de sinal, tolerância à falha, etc.

Além destas vantagens sobre os sistemas analógicos, os sistemas digitais funcionam de maneira mais integrada ao sistema, facilitando a gerência da planta e a tomada de decisões por parte do operador do sistema. Em suma, tem-se um controle supervisorio mais simplificado, com maior poder de “*surveillance*”, ou monitoramento, já que este é baseado na alta capacidade da rede de computadores processar informações e possibilitar ao operador uma avaliação em tempo real da situação operacional da planta através de uma interface com ergonomia cognitiva otimizada e com uma gama variada



de funções de proteção do sistema, permitindo, dessa maneira, melhorar a tomada de decisões e adoção de contramedidas. Além disso, a utilização de sistemas analógicos necessita de testes periódicos que requer a retirada de um serviço durante a execução dos mesmos, reduzindo, portanto, a redundância do sistema, ao passo que nos sistemas digitais, os testes podem ser realizados concomitantemente à operação do serviço.

Em condições anormais, sistemas digitais fornecem ação automática rápida para proteger a planta e o meio ambiente [4]. Logo, a utilização de sistemas digitais aliada à filosofia de segurança de operação minimiza a probabilidade de ocorrência de erros causados pelo operador do sistema e confere todas as já citadas vantagens em relação aos sistemas digitais. Portanto, dado este conteúdo, o trabalho vem a atender uma necessidade corrente das instalações nucleares dos dias de hoje: otimização na segurança, flexibilidade e confiança nas operações, rapidez no processo da informação e alívio de carga de trabalho para o operador. Todos esses requisitos compartmentados em uma proposta tanto quanto possível inovadora, baseada na utilização de componentes comerciais.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

Elaborar técnica digital para indicação da posição das barras de controle do reator nuclear do LABGENE.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar revisão de literatura sobre os seguintes conhecimentos: física nuclear, operação de reatores, sistema de movimentação de barras de controle, sistema de indicação de posição de barras de controle e circuito condicionador de sinais;
- b) Contribuir para o desenvolvimento do projeto do sistema de indicação de posição das barras de controle do LABGENE; e
- c) Desenvolver a conexão entre o conhecimento de formação universitária (automação) e o de formação no curso de aperfeiçoamento avançado

(tecnologia nuclear).

#### 1.4 METODOLOGIA

Para atingir o propósito deste trabalho, será realizado o projeto conceitual de um circuito eletrônico de indicação da posição das barras de controle do LABGENE. O projeto consiste em duas fases: montagem do circuito – que inclui a indicação de componentes utilizados e a interligação dos blocos funcionais – e o funcionamento do circuito. Para isso será usado o software de simulação de circuitos eletrônicos ISIS PROTEUS.

#### 1.5 ESTRUTURA DO TCC

Este trabalho é estruturado da seguinte forma: o capítulo 1 tem por função apresentar o problema e contextualizá-lo ao projeto de conclusão de curso, além de estabelecer os objetivos do trabalho e o plano de ação para a concretização desses.

Já no capítulo 2, desdobram-se os conceitos fundamentais que dão sustentação à linha de raciocínio desenvolvida no capítulo seguinte.

No capítulo 3, descrevem-se os componentes e a montagem do circuito.

No capítulo 4, analisam-se os resultados da simulação do circuito.

No último capítulo, será feita a conclusão do conteúdo apresentado no trabalho, propondo temas para trabalhos futuros, com melhorias para o desenvolvimento dessa temática.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo serão abordados os conceitos teóricos que compõem a base deste trabalho. Abordam-se os princípios físicos de uma reação nuclear e de um reator, bem como o princípio de funcionamento de cada componente que integra a malha de instrumentação de um indicador de posição das barras de controle.

### 2.1 CONCEITOS DE FÍSICA NUCLEAR

A Física Nuclear estuda, dentre outras coisas, o mecanismo de diferentes reações nucleares e a compreensão da interação entre os constituintes da matéria nuclear [5]. De posse de tal conhecimento, a humanidade pôde entender melhor o mundo físico, constituído de uma combinação de partículas fundamentais, constituintes do átomo, tais como o próton, o elétron e o nêutron [6].

Essas partículas podem interagir com a matéria por meio das chamadas reações nucleares. Dentre diversas dessas, às de particular interesse para o trabalho são as que ocorrem com o nêutron, pois representam grande parte do que acontece no núcleo do reator nuclear. As reações com o nêutron são facilitadas pelo fato da ausência de carga e da diferença de massa com o elétron possibilitar ao mesmo atravessar a nuvem eletrônica do átomo e colidir com o seu núcleo, ocasionando, dessa forma, a reação nuclear [6]. As principais interações neutrônicas estão representadas abaixo:

- a) Fissão Nuclear: reação na qual ocorre colisão do nêutron com o núcleo do átomo, causando a divisão do mesmo em outros átomos, liberando outros nêutrons e energia [6];
- b) Espalhamento elástico: reação onde o nêutron colide com um núcleo de massa igual ou próxima à dele, transferindo parte de sua energia e mudando de direção [7];
- c) Espalhamento inelástico: reação onde o nêutron colide com um núcleo de massa superior, formando um “núcleo composto” no estado excitado. Na sequência, o núcleo libera essa energia sob forma de raio gama [7];
- d) Captura radioativa: reação onde o núcleo absorve o nêutron e, posteriormente, emite radiação gama [6]; e

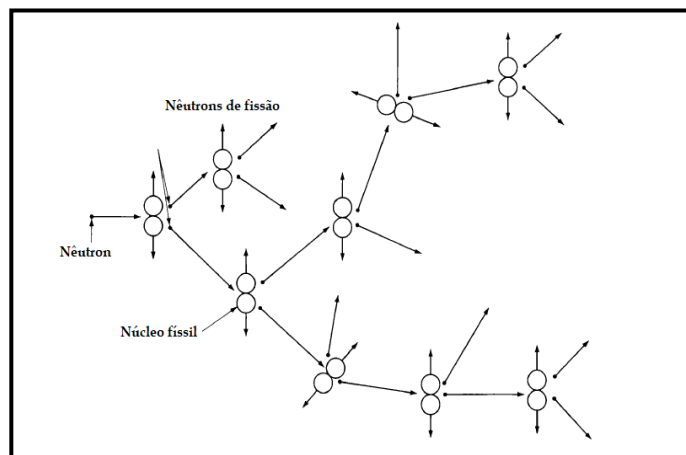
- e) Formação de partículas carregadas: reação onde o núcleo absorve o nêutron e, posteriormente, emite prótons ou partículas alpha.

A partir da interação nêutron-núcleo, qualquer uma dessas reações poderá ocorrer, sendo essa possibilidade diretamente proporcional à sua seção de choque, que representa a extensão de quanto os nêutrons interagem com cada elemento [6]. Logo, a probabilidade de ocorrência de um dos eventos será tão maior quanto for a seção de choque de um determinado elemento para cada um deles.

## 2.2 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UM REATOR NUCLEAR

O reator nuclear é um equipamento cuja estratégia de obtenção de energia ocorre a partir da reação de fissão nuclear de determinados isótopos, como, por exemplo, o Urânio-235 [8]. Dessa forma, a fonte de geração de energia desses reatores é a reação em cadeia, que consiste na emissão de nêutrons gerados pela fissão de um núcleo de um desses materiais, que irão bombardear outros núcleos, repetindo o mesmo processo e liberando, aproximadamente, 200 MeV a cada fissão, tal energia é a somatória das energias dos fragmentos da fissão, do decaimento dos produtos da fissão, da liberação de raios gamas e da energia cinética dos nêutrons de fissão [8]. A reação em cadeia está representada pela Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática da reação em cadeia



Fonte: [6]

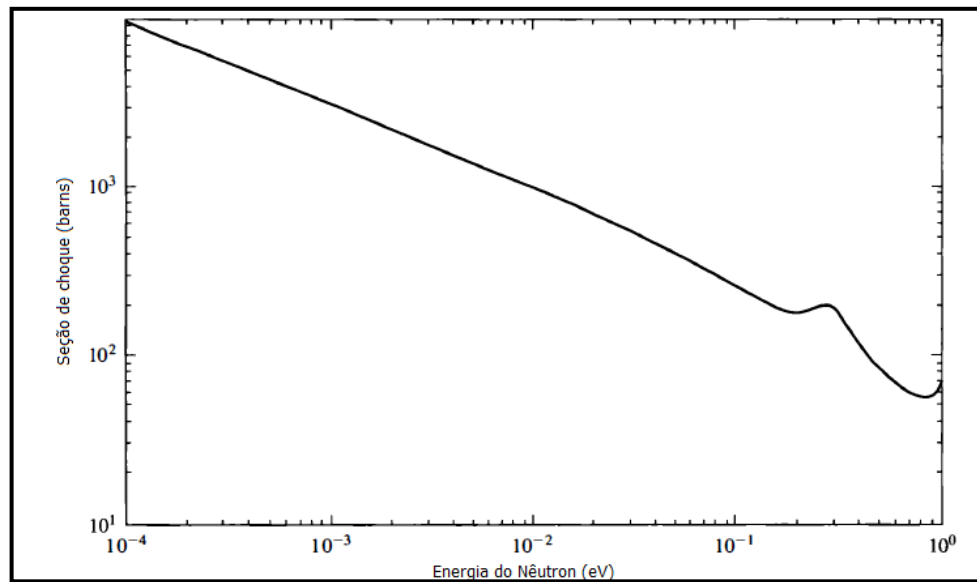
Para sustentá-la, o alvo a ser fissionado deve reunir as condições de ter alta seção de choque para fissão e produzir boa quantidade de nêutrons a cada colisão. Logo, dentre os isótopos citados, ganha relevância o Urânio-235, encontrado na proporção isotópica de 0,7% da massa do Urânio e utilizado na maioria dos reatores nucleares do mundo.

Para ser possível sua utilização em larga escala, é preciso enriquecê-lo, ou seja, aumentar a concentração isotópica do Urânio-235 na constituição do Urânio e, após diversos processos, convertê-lo em pastilhas de  $UO_2$ , que serão utilizadas como unidades energéticas dos elementos combustíveis no reator [8]. Dessa forma, essas pastilhas serão montadas de tal forma, que se constitua uma massa crítica capaz de iniciar uma reação em cadeia. Entretanto, o controle e a manutenção de tal fenômeno se dá com o auxílio de outros elementos, os quais serão discutidos no subcapítulo 2.2.1.

### **2.2.1 Controle e manutenção da reação em cadeia**

Para entender a reação em cadeia, antes de tudo, é preciso conhecer o conceito de nêutrons rápidos, nêutrons epitérmicos e nêutrons térmicos: os primeiros possuem alta energia ( $E_n > 100 \text{ KeV}$ ), os segundos média energia ( $0.3 \text{ KeV} < E_n < 10 \text{ KeV}$ ) e, por fim, os nêutrons térmicos, baixa energia ( $E_n < 0.3 \text{ KeV}$ ). Em segundo lugar, é necessário entender o conceito de seção de choque, que é a extensão da interação dos nêutrons com o núcleo. Este indica a possibilidade de ocorrência de uma reação nuclear, pois quanto maior a seção de choque de um elemento para determinada reação, maior será a probabilidade de sua ocorrência. A seção de choque de fissão do Urânio-235 varia de maneira inversa com a energia do nêutron, como explica a Figura 2.

Figura 2 – Seção de Choque do Urânio 235



Fonte: [6]

Nêutrons rápidos dificilmente fissionam o U-235 e, conseqüentemente, não conseguem sustentar uma reação em cadeia. Dessa forma, se faz necessária a inclusão de um elemento moderador, constituído de um elemento leve, com alta seção de choque para o espalhamento, geralmente água ( $H_2O$ ) ou deutério ( $D_2O$ ), capaz de reduzir a energia do nêutron, de modo que este possa fissionar mais facilmente o átomo de U-235 e assim sustentar uma reação em cadeia.

No que tange ao controle da reação, se somente a geração de novos nêutrons – que usualmente para o U-235 é de dois ou mais nêutrons por fissão [9] – estiver presente, o número de nêutrons crescerá exponencialmente. Contudo, certos fatores físicos os retiram do sistema, mantendo constante esse número, são eles:

- a) A fuga de nêutrons rápidos do sistema;
- b) A absorção por captura radioativa pelo Urânio 238;
- c) A absorção por elementos não combustíveis; e
- d) A fuga de nêutrons térmicos do sistema.

Dentre os fatores que contribuem para a reação em cadeia, está o fato de pequena parcela dos nêutrons gerados fissionarem o Urânio-238 (aproximadamente 15%). O resultado de todos esses fenômenos que podem ocorrer com o nêutron pode ser

resumido, matematicamente, pela fórmula dos seis fatores, que indica a razão entre nêutrons geração atual e da geração anterior [10].

$$k = \varepsilon P_f p P_t f n \quad (1)$$

De onde:

$\varepsilon$  : Fator de fissão rápida

$P_f$  : Probabilidade de não fuga rápida

$p$  : Probabilidade de escape à ressonância

$P_t$  : Probabilidade de não fuga térmica

$f$  : Utilização térmica

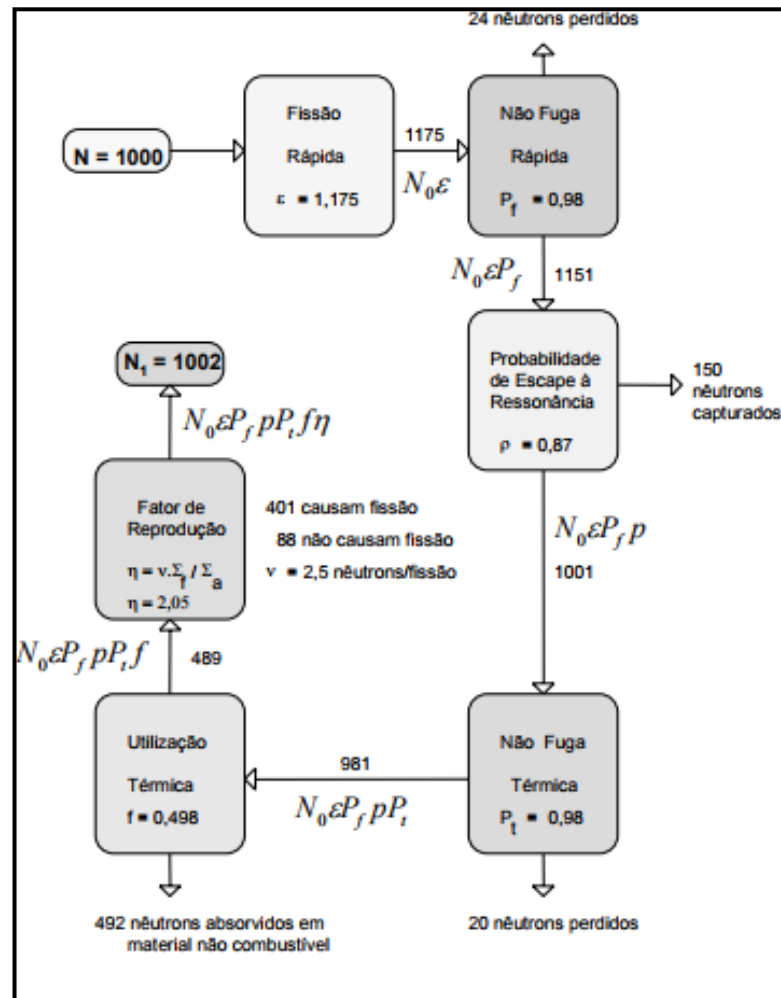
$n$  : Fator de produção de nêutrons

A Figura 3 ilustra graficamente como se realiza o processo de geração de nêutrons no núcleo de um reator. O exemplo considera uma situação hipotética, com uma geração de 1000 nêutrons.

- a) Por fissão rápida, geram-se 175 novos nêutrons. Total = 1175;
- b) Por fuga rápida, 24 nêutrons são perdidos. Total = 1151;
- c) Por captura na ressonância, 150 nêutrons são perdidos. Total = 1001;
- d) Por fuga não térmica, 20 nêutrons são perdidos. Total = 981
- e) 492 nêutrons são absorvidos no elemento não combustível. Total = 489; e
- f) Destes 492, 401 causam fissão, gerando, em média, 2,5 nêutrons por cada uma delas. Total = 1002.

Dessa forma, a geração de nêutrons seguinte tem o número aproximadamente igual à anterior, mantendo uma reação em cadeia sustentável.

Figura 3 – Fórmula dos seis fatores



Fonte: [10]

A razão entre as gerações de neutros é medida pelo fator  $k$ , que indica a criticalidade da reação no núcleo do reator, podendo esse estar num estado supercrítico ( $k > 1$ ), subcrítico ( $k < 1$ ), ou crítico ( $k = 1$ ), esse último deve ser alcançado para um estado estacionário de operação. Para que isso seja possível, é necessário desenvolver um projeto onde os materiais e a geometria do núcleo considerem parâmetros físicos que garantam atingir e manter a criticalidade em seu núcleo, que é controlada pelo movimento das barras de controle, inserindo reatividade positiva ou negativa, ou seja, controlando a quantidade de nêutrons no núcleo.



## 2.2.2 Componentes e operação de um reator PWR.

A Tabela 1 fornece uma descrição dos principais componentes do gerador PWR.

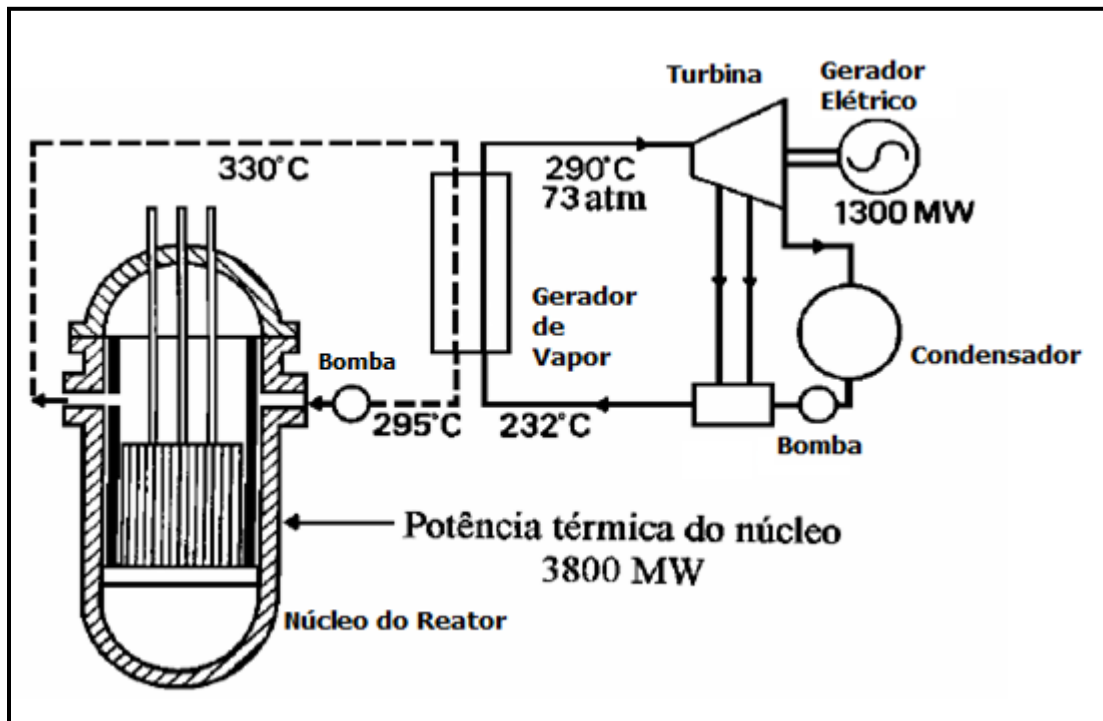
Tabela 2.1 – Principais elementos do Reator PWR

CLASSIFICAÇÃO	FUNÇÃO	MATERIAIS PRINCIPAIS
<b>COMBUSTÍVEL NUCLEAR</b>	Tem a função de conter os elementos fisséis e férteis que irão produzir as fissões da reação em cadeia	Urânio (U), Plutônio (Pu), Tório (Th).
<b>ESTRUTURAS</b>	são todos os materiais utilizados como estrutura e revestimento dos diversos componentes do reator	Zircaloy (Zr), aço inox (Liga de Fe-Cr), ligas de níquel (Ni)
<b>MODERADORES</b>	tem a função de moderar a energia dos neutrons produzidos na fissão e também servem como refletores na periferia do núcleo do reator de forma a minimizara fuga de neutrons do núcleo	Grafite (C), Água leve ( $H_2O$ ), Água Pesada ( $D_2O$ ), Berílio (Be)
<b>ABSORVEDORES (controlador)</b>	tem a função de manter de forma controlada a reação em cadeia dentro do núcleo	Boro (B), Cádmiio (Cd), Háfnio (Hf), Índio (In), Prata (Ag), Gadolínio (Gd)
<b>REFRIGERANTES</b>	tem a função de retirar o calor gerado no núcleo do reator devido às fissões nucleares	Hélio (He), Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), Água leve ( $H_2O$ ), Água pesada ( $D_2O$ ) e metais líquidos (NaK, Na)
<b>BLINDAGEM</b>	tem a função de servir de barreira para a radiação (blindar) de forma a atenuar os efeitos desta sobre componentes estruturais ou o meio exterior ao reator	Água leve ( $H_2O$ ), elementos de médio e alto número atômico (Pb, Fe, etc.)

Fonte: [8].

Tais componentes possibilitam a reação em cadeia, gerando potência térmica no núcleo do reator que deve ser extraída para ser convertida outras formas de energia, como a elétrica, por exemplo. Esse processo de conversão de energia térmica para elétrica é feito a partir de circuitos termodinâmicos, como ilustrado na Figura 4:

Figura 4 -Operação de um reator PWR



Fonte: [9]

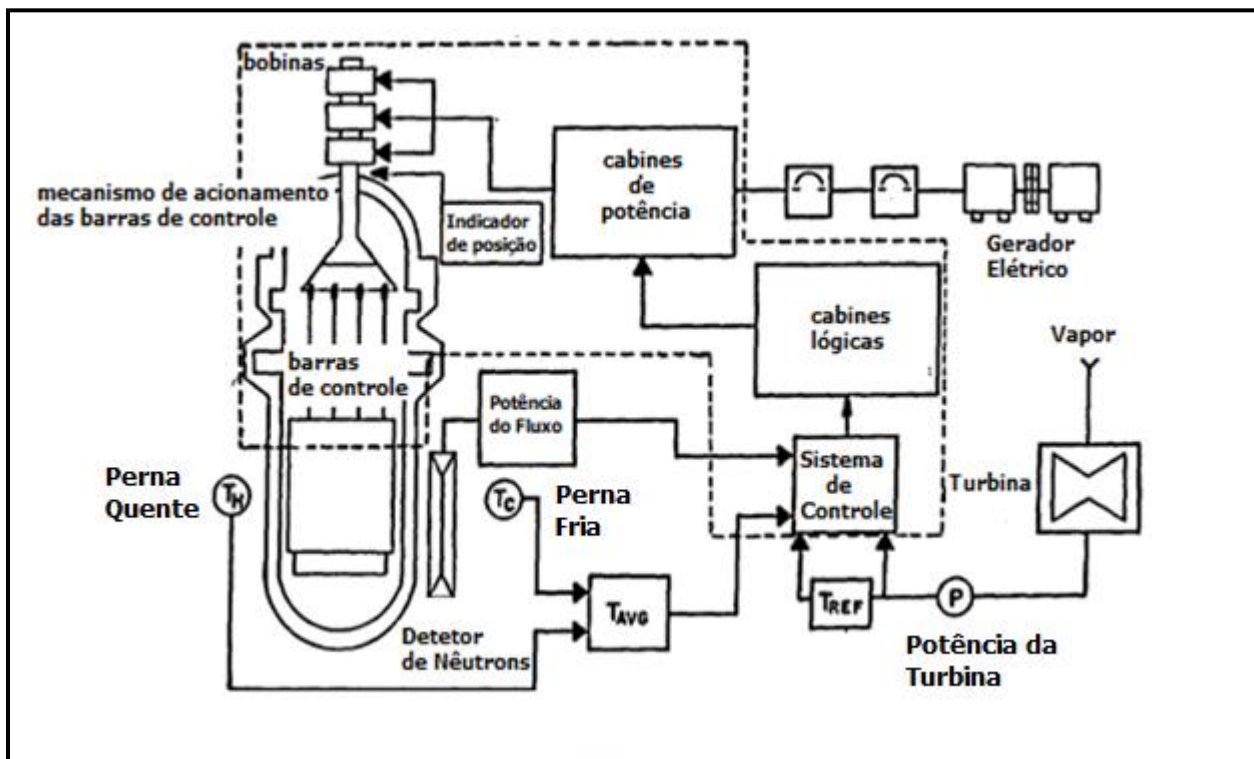
Nesse tipo de operação, o reator transfere energia térmica para o fluido refrigerante do circuito primário, que troca calor com o secundário através de um gerador de vapor. Esse vapor passa pela turbina, convertendo a energia térmica em energia mecânica. Após isso, o vapor à baixa pressão passa por um condensador e retorna à fase líquida, que entrará no gerador de vapor reiniciando o ciclo. A transformação da potência térmica do núcleo em potência elétrica no gerador acoplado à turbina é feita pelo Ciclo de Rankine, cujo rendimento é aproximadamente 33% em reatores nucleares [11], no caso da Figura 4, houve transformação de  $3800\text{ MWt}$  em  $1300\text{ MW}$  elétricos. A queda no rendimento é composta pelas perdas pela eficiência dos componentes, atrito nas tubulações, rendimento térmico dos trocadores de calor e acoplamento turbina-gerador, dentre outras.

O processo que ocorre no reator PWR é o mais utilizado dentre todos os processos de geração energia nuclear no mundo, possibilitando a utilização dessa energia tanto para alimentar a rede elétrica como para aplicações militares, dentre elas, a propulsão naval [11].

### 2.3 MECANISMO DE ACIONAMENTO DE BARRAS DE CONTROLE

O mecanismo de acionamento de barras de controle, representado na Figura 5, é um conjunto de blocos que se interligam em malha fechada, ou por solicitação do operador do sistema, para garantir o movimento das barras de controle de modo a atender a demanda de potência por meio do controle da reatividade [12]. O sistema deve atuar também em desligamento de emergência, caso seja necessário, com a margem de segurança de uma barra presa [12].

Figura 5 – Sistema de movimentação de barras de controle eletromecânico



Fonte: [12].

Como supracitado, o sistema de movimentação de barras de controle é formado por blocos, os quais são definidos abaixo:

- Bloco do sistema de controle: possui dois circuitos de comparação, um que compara a potência medida pela atividade nuclear do núcleo do reator (Potência de fluxo) com a potência  $P$  da turbina e outro que compara a média de temperatura entre a perna fria (abertura por onde escoar a água ao final do

ciclo do circuito primário) e a perna quente (abertura por onde escoar a água no início do ciclo do circuito primário),  $T_{AVG}$ , com a temperatura  $T_{REF}$ , transformada a partir da potência  $P$  da turbina. De ambas as comparações, resulta dois sinais de erro, um de potência e outro de temperatura, que são somados, transmitidos e transformados num sinal analógico. Este sinal vai determinar, ao final do processo, a direção (pela polaridade do sinal) e a velocidade das barras de controle (pela magnitude do sinal) [12];

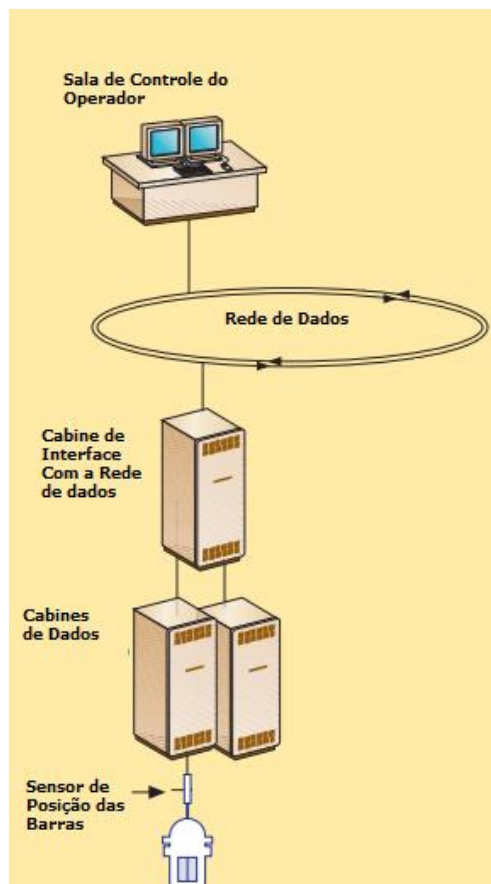
- b) Conversores lógicos: transformam os sinais analógicos advindos do bloco anterior em pulsos digitais. Esses pulsos são gerados a partir de uma interpretação lógica dos parâmetros de cada sinal analógico (polaridade e magnitude). Os pulsos gerados determinam a velocidade, direção e sequência de acionamento das barras de controle [12];
- c) Conversores de potência: transformam os comandos recebidos das cabines lógicas em tensões aplicadas nas bobinas do mecanismo de acionamento das barras [12];
- d) Mecanismo de acionamento das barras de controle: recebem tensões em suas bobinas, respondendo por meio da movimentação das barras, seja inserindo ou retirando-as do núcleo do reator [12]; e
- e) Indicador de posição das barras de controle: circuito eletrônico que indica o posicionamento da barra de controle e segurança, é basicamente os olhos do sistema no núcleo do reator, permitindo ao operador o monitoramento e acompanhamento do processo de inserção e retirada de reatividade [13]. Esse circuito compõe o foco do trabalho e será tratado no capítulo seguinte.

## 2.4 INDICADOR DE POSIÇÃO DAS BARRAS DE CONTROLE

O indicador de posição das barras de controle é um sistema que monitora continuamente a posição das barras de controle, tanto as designadas para o controle normal de operação como as de desligamento seguro, apresentando essa informação numa Interface Homem-Máquina (IHM). A concepção básica de um indicador digital de posição das barras de controle dispõe de sensores, axialmente distribuídos e igualmente espaçados, ao longo dos tubos, que captam a presença das barras na indicação de altura

em que estão instalados e enviam tal informação para uma cabine de dados, onde esta será condicionada, convertida em sinal digital e enviada para uma cabine que fará a interface com a rede de dados, tornando-os apresentáveis para o operador do sistema[14]. Na Figura 6, pode-se visualizar o esquema do supracitado sistema de indicação de posição das barras de controle.

Figura 6 – Sistema de indicação da posição das barras de controle



Fonte: [14]

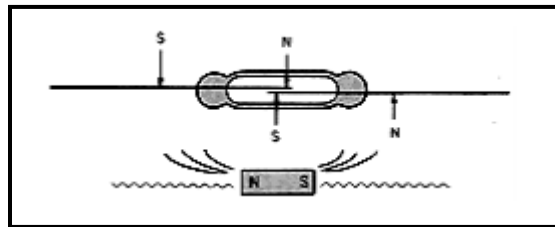
Para poder indicar a posição das barras de controle, o sistema proposto utiliza o princípio da indução magnética para estabelecer a interação entre a barra e sensor de chaves magnéticas, cuja filosofia se consolidou para aplicações de baixa potência [31]. Esse tipo de sensor possui determinadas vantagens sobre outros sistemas, tais como baixa potência para funcionamento e maior sensibilidade para atuação por meio da indução magnética, dentre outras vantagens que serão discutidas mais à frente.

### 2.4.1 Chaves magnéticas

As chaves magnéticas consistem num par de contatos flexíveis feito de material magnético envolvidos num tubo de vidro preenchido com gás inerte. A área de uma chave magnética é revestida com metal nobre, tal como o Ródio ou Rutênio, para fornecer estabilidade e boa vida útil ao componente. Seus contatos são movidos e fechados pela aplicação de um campo magnético [15].

Para aplicação nas barras de controle, na sugestão de Yu (2007) [16], as chaves são magnetizadas pelo alinhamento com o ímã permanente localizado na ponta de cada barra de controle e segurança. Esses ímãs se movimentam juntamente a elas, indicando a posição da mesma, no momento em que fecham o contato da chave magnética mais próxima, pelo princípio da indução magnética, como se pode notar na Figura 7 [16]:

Figura 7 – Magnetização da “Reed Switch” pelo ímã permanente

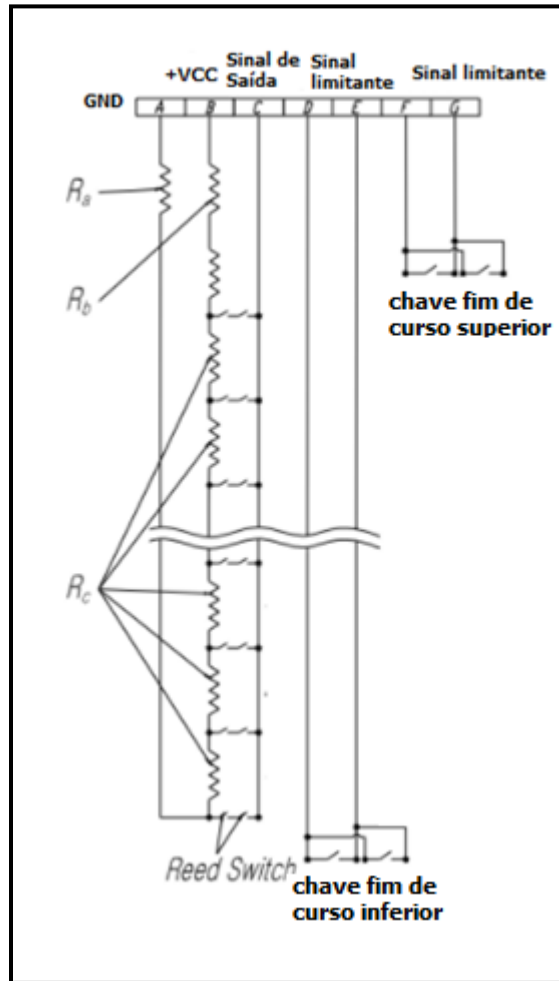


Fonte: [15]

Segundo sugestão de Yu (2007) [16], a montagem das chaves magnéticas deve consistir numa distribuição igualmente espaçada entre elas ao longo do comprimento dos tubos guias das barras de controle de um reator, de forma a permitir um monitoramento constante. Além disso, a montagem deve atender ao princípio de redundância e diversidade [17], essencial para evitar falhas e conferir credibilidade para o processo, além de evitar falha de modo comum, atendendo aos princípios da IAEA Safety Standards [17].

Diante do exposto, a Figura 8 mostra a disposição de sensores de chaves magnéticas numa placa de circuito integrada montada sobre um tubo guia de um reator.

Figura 8 – Circuito divisor de tensão da “Reed Switch”



Fonte: [16]

A partir da observação da Figura 8, nota-se a que a montagem em série das chaves magnéticas em cada intervalo evita que o travamento de uma na posição de contato fechado implique em falsa medição da posição de barra [16]. Outro fator que deve ser atendido é o espaçamento adequado entre os sensores, na ordem de dezenas de milímetros, de modo que a indução magnética ímã permanente não feche dois contatos próximos ao mesmo tempo.

Cada dupla de chaves magnéticas é colocada em uma determinada posição do divisor de tensão, o que resultará em uma tensão de saída proporcional à posição da barra de controle e segurança. A tensão analógica de saída, resultante da divisão de tensão, será tratada em um circuito condicionados de sinais.

## 2.5 CIRCUITO CONDICIONADOR DE SINAIS

O circuito condicionador de sinais funciona como interface entre dois circuitos ou sistemas, cuja função é adaptar o sinal às necessidades do circuito ou sistema que irá recebê-lo. Para tanto, pode ser composto uma diversidade de operações: multiplexação, demultiplexação, conversão D/A, conversão A/D, filtragem, limitação, detecção, conversão de corrente para tensão ou tensão para corrente e conversão de frequência, dentre outras. Para a proposta do trabalho, será dado ênfase aos seguintes componentes de um circuito condicionador de sinais: filtros elétricos passivos de primeira ordem, contador, multiplexador, conversor de tensão/frequência (pulsos digitais) e componente de interface RS-485.

### 2.5.1 Filtros elétricos

Filtros elétricos são quadripolos que permitem a passagem de um espectro de frequência conforme tipo de filtragem e atenua as demais faixas [20]. Neste trabalho, serão usados para filtrar os ruídos causados, principalmente, pela descarga eletrostática do fechamento de contatos e pelo ruído causado por emissões eletromagnéticas de outros equipamentos.

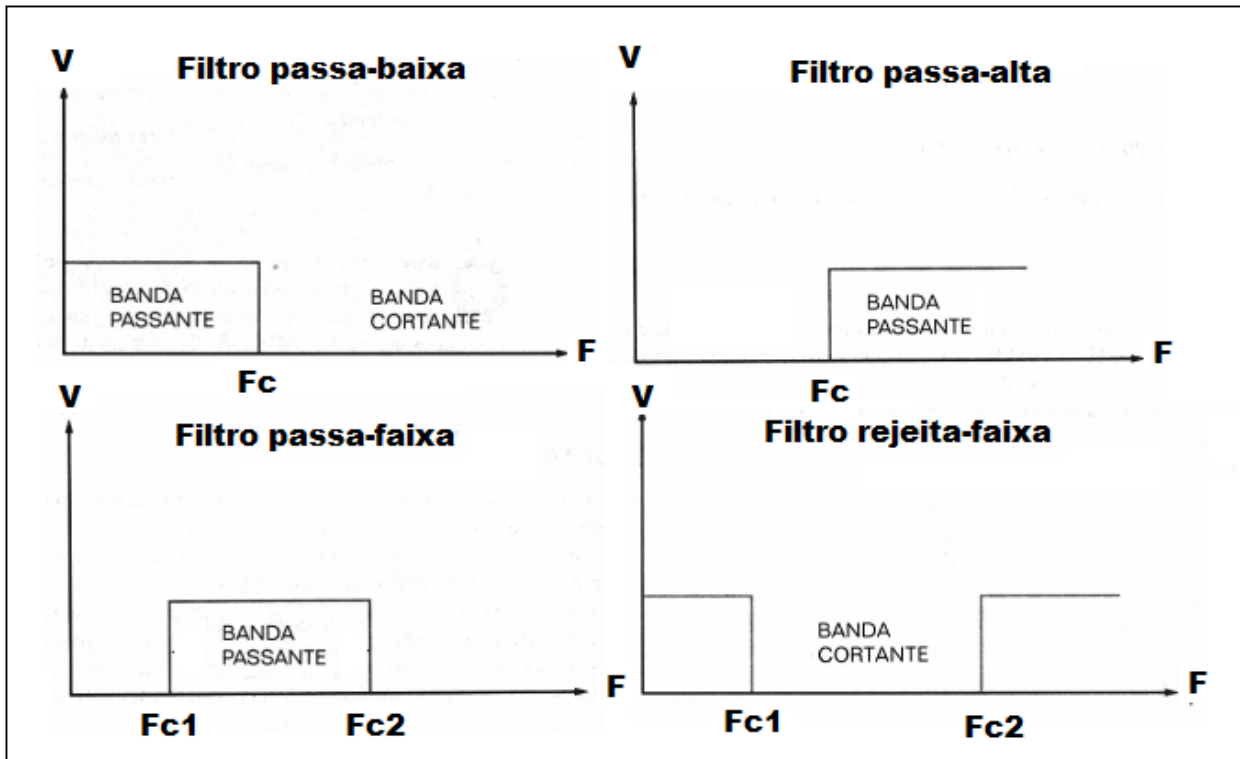
Os filtros podem ser classificados de acordo com a faixa de frequência que não é atenuada, ou sofre mínimas atenuações após a filtragem [18]:

- a) Passa-baixa: rejeita a banda de frequência que está acima da frequência de corte projetada;
- b) Passa-alta: rejeita a banda de frequência que está abaixo da frequência de corte projetada;
- c) Rejeita-faixa: Rejeita a frequência dentro do limite projetado entre duas frequências de corte; e
- d) Passa-faixa. Rejeita a frequência dentro do limite projetado entre duas frequências de corte.

A Figura 9 ilustra os tipos de filtros acima mencionados



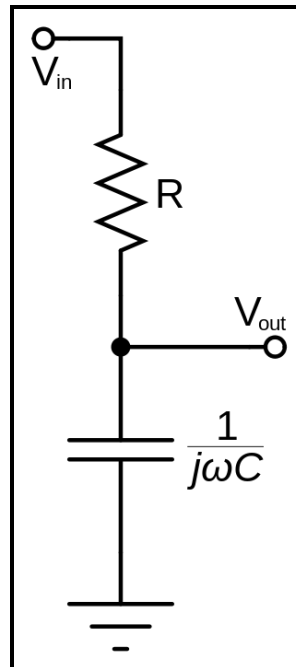
Figura 9 – Tipos de filtragem



Fonte: própria

Na Figura 9,  $V$  é a tensão e  $F_c$  a frequência de corte. Especificamente para esse trabalho, será usada a topologia de filtro passa-baixa, pois rejeita os ruídos que prejudicam a indicação da posição das barras, causando interferências e informações imprecisas. Uma topologia comum de filtro passa baixa, consiste na utilização um circuito RC (resistivo-capacitivo), como mostra a Figura 10. Por sua vez, a Figura 11 expressa o diagrama de Bode de um filtro passa-baixa, representando a atenuação do sinal do mesmo em função da frequência do sinal.

Figura 10 – Topologia de um filtro passa-baixa



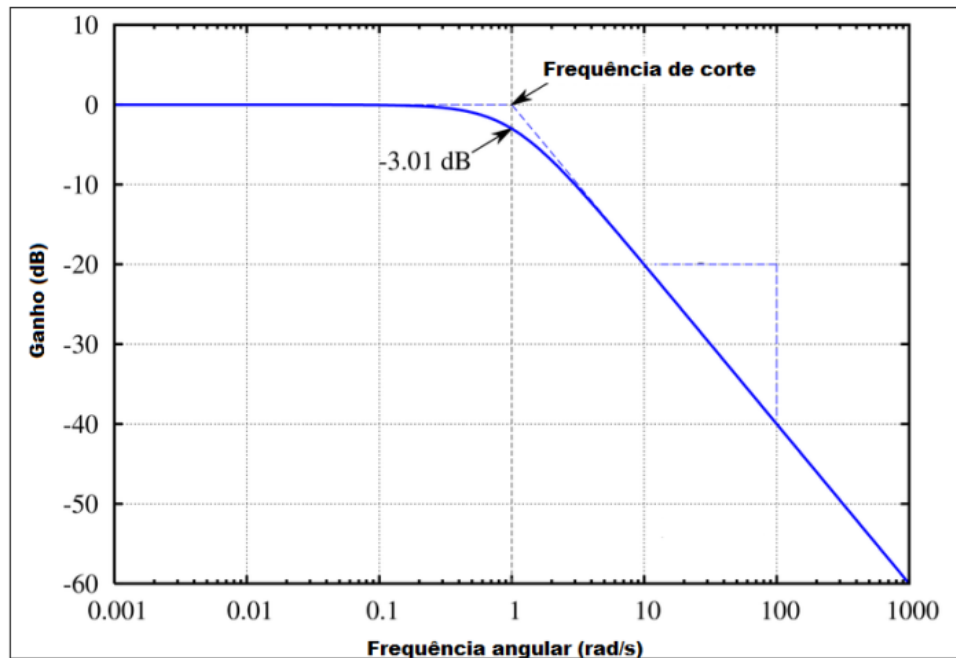
Fonte: Wikipédia ( Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro\\_passa-baixo](https://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro_passa-baixo)> Acesso em: 09 Jan. 2019)

A frequência de corte deste filtro, representado na Figura 10, é:

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2)$$

A atenuação do filtro passa-baixa pode ser representada graficamente pelo Diagrama de Bode, exposto na Figura 11, que expõe o ganho do sinal em função da frequência.

Figura 11 – Diagrama de Bode de um filtro passa-baixa



Fonte: Wikipédia ( Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Resposta\\_em\\_frequ%C3%Aancia](https://pt.wikipedia.org/wiki/Resposta_em_frequ%C3%Aancia) > Acesso em: 10 Dez. 2017)

O Diagrama de Bode é uma das mais importantes referências para o projeto de filtros eletrônicos. A Figura 11 expõe o Diagrama de Bode de um filtro passa-baixa. Na frequência de corte projetada (Equação 2) existe uma queda imediata na tensão (perda de 3,01dB), fazendo com que a tensão de saída perca 39,3% do valor da tensão de entrada ( $V_{saída} = 0,703 V_{entrada}$ ). A Equação 3 representa a atenuação da tensão de entrada no Diagrama de Bode

$$dB = -20 \log \frac{V_{saída}}{V_{entrada}} \quad (3)$$

Já a Equação 4 representa sua equação de fase.

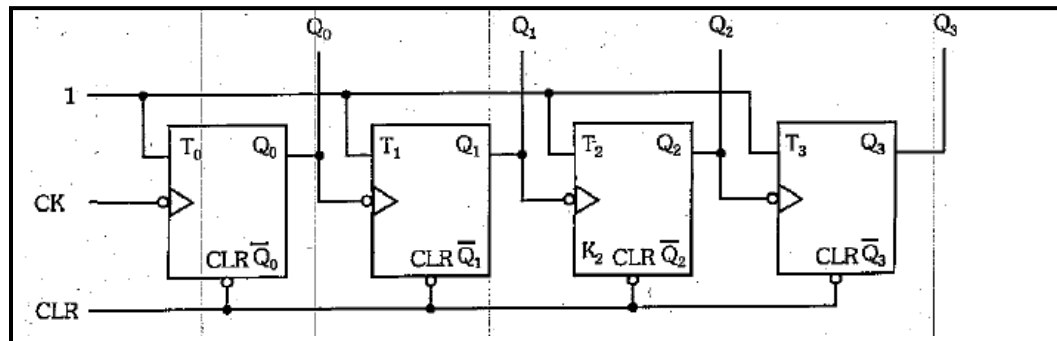
$$\angle G(j\omega) = \angle \left( \frac{1}{1 + j\omega} \right) \quad (4)$$

## 2.5.2 Contadores

Os contadores são circuitos digitais-binários, ou sejam, aceitam como resposta 0 ou 1, compostos de flip-flops, comandados por seqüências de pulsos. Estes podem realizar uma gama de aplicações, tais como; contagens, divisores de frequência e medições de tempo. Podem ser divididos em duas categorias: Assíncronos e Síncronos. Neste trabalho, serão usados para chavear os canais de entradas do multiplexador a partir dos canais de seleção.

Os contadores assíncronos são compostos de flip-flops do tipo D. São assim chamados, pelo fato da entrada do clock (CK) estar conectada apenas ao primeiro flip-flop, cuja saída ( $Q_0$ ) se conecta na entrada do flip-flop seguinte e assim por diante, como mostra a Figura 12 [19].

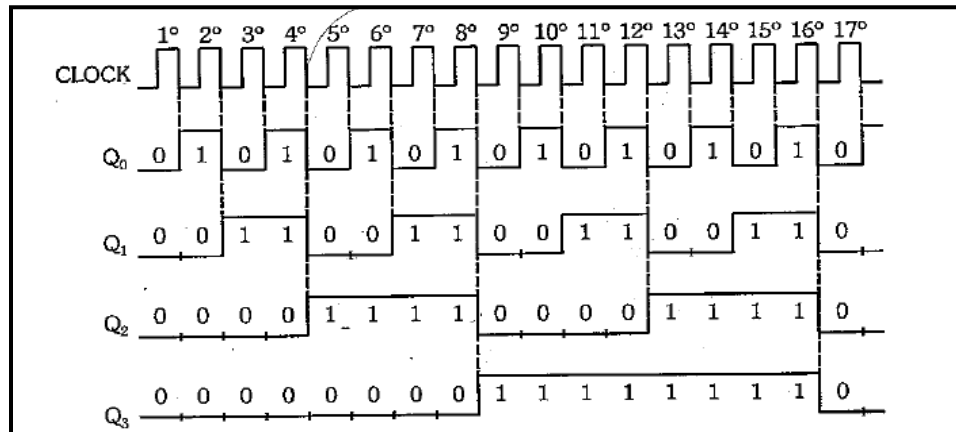
Figura 12 – Flip-Flop assíncrono



Fonte: [19].

Portanto, nessa configuração, os pulsos no clock (CK) são contados pelo incremento das saídas ( $Q_0, Q_1, Q_2, Q_3$ ), da esquerda para a direita, sendo  $Q_0$  o bit menos significativo e  $Q_3$  o mais significativo. Como existem 4 saídas, este circuito conta de 000 a 111, ou seja, 15 decimal. A contagem dos pulsos é ilustrada na Figura 13 [19].

Figura 13 – Contagem de clocks



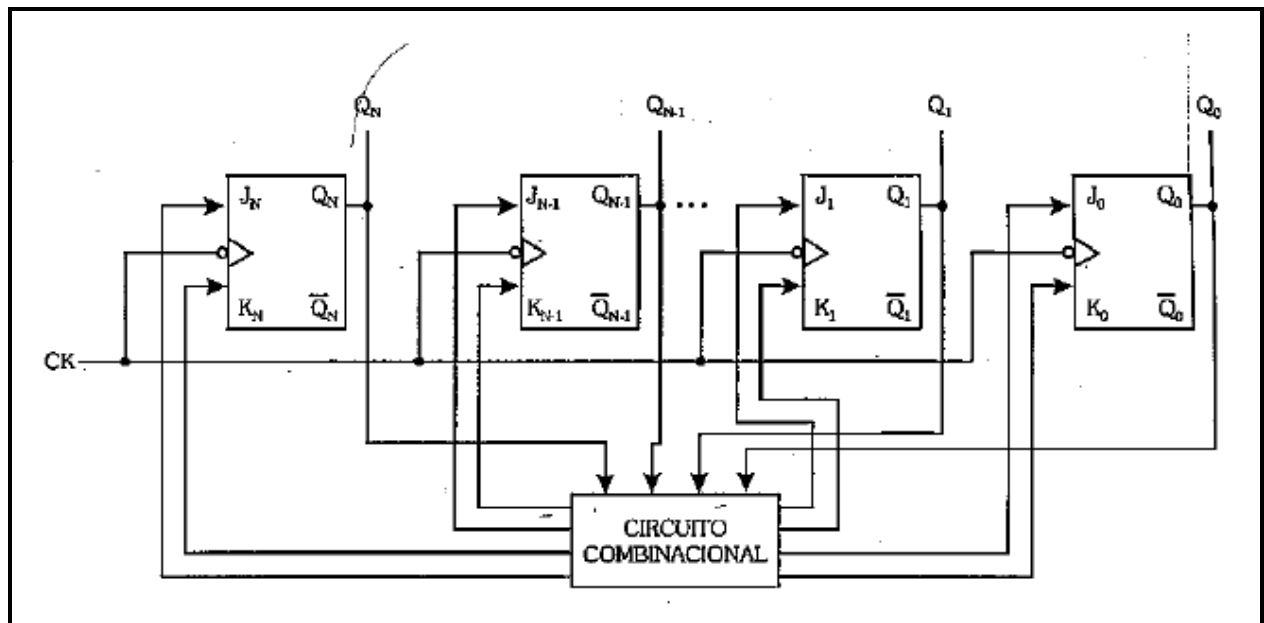
Fonte: [19].

Pela Figura 13, nota-se que a frequência do sinal da saída imediatamente mais significativa é o dobro da anterior, como ocorre com as saídas de  $Q_0$  a  $Q_3$ . Isso ocorre porque o sinal de uma determinada saída, por exemplo, a saída  $Q_0$ , é conectada à entrada do flip-flop seguinte, cuja saída é  $Q_1$ , e assim por diante. Após extrapolar a máxima contagem, todas as saídas retornam ao nível baixo (nível lógico 0), reiniciando a contagem. No caso da Figura 13, a contagem é reiniciada após o décimo sexto ciclo de clock, que retorna o contador para o estado inicial ao somar um bit à contagem máxima.

Em cada flip-flop, é também conectada uma entrada de clear (CLR), cuja função é levar todas as saídas para o estado baixo (0) a partir do próximo pulso de clock quando essa for para o estado baixo também, ou seja, ela zera o contador.

Os contadores síncronos, ao contrário dos assíncronos, podem gerar qualquer sequência numérica [19]. No que tange à sua topologia, possuem o clock (CK) ligados à todos os flip-flops, que são do tipo JK, e as saídas ligadas diretamente a um circuito combinacional, que tem por saída, as entradas J e K do contador. Dessa maneira, como a evolução do estado das saídas dependem do estado das entradas J e K, conforme Tabela 2.1, a implementação da sequência numérica desse circuito depende do projeto do circuito combinacional ao qual ele está ligado. A Figura 14 mostra um exemplo de contador síncrono.

Figura 14 – Contador síncrono



Fonte: [19].

Como foi dito, a mudança de estado das saídas de cada um dos flip-flops JK são controladas pelas entradas J e K, conforme exposto na Tabela 2.1, onde  $Q_a$  é a saída atual,  $Q_f$  a saída futura e X um estado indiferente, podendo este ser 0 ou 1.

Tabela 2.2 – Tabela verdade do Flip-Flop JK

$Q_a$	$Q_f$	J	K
0	0	0	X
0	1	1	X
1	0	X	1
1	1	X	0

Fonte: [19].

A Tabela 2.2 mostra que a progressão das saídas (de 0 para 1 e de 1 para 0) só ocorrerão, respectivamente, quando  $J = 1$  e  $K = 1$ , caso contrário, o nível lógico da saída é mantido. Esta regra vale para todas as saídas e as variáveis J e K que são controladas pelo circuito combinacional. A descida do clock só incrementará o contador mediante condições dos pinos J e K, como pode ser visto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Contagem de pulsos de um contador síncrono

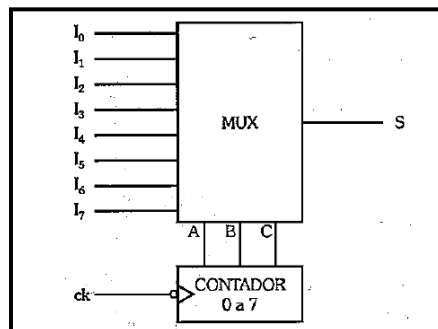
Descida do clock	Q1	Q2	J1	K1	J2	K2
1ª	0	0	0	X	0	X
2ª	0	0	0	X	1	X
3ª	0	1	1	X	X	1
4ª	1	0	X	0	1	X
5ª	1	1	X	0	X	1
6ª	1	0	X	1	1	X
7ª	0	1	0	X	X	1
-----	0	0	-----	-----	-----	-----

Fonte: própria

### 2.5.3 Multiplexadores

O multiplexador é um circuito eletrônico que envia as informações de vários canais paralelos por um único canal [20]. É comandado por um grupo de canais de seleção, que seleciona o canal da informação na entrada que será enviado para a saída [20]. Dessa forma, é possível enviar todos os sinais de interesse, um a cada vez, reduzindo as linhas de transmissão, economizando recursos. Neste trabalho, este será usado para multiplexar os sinais dos IPMAB's por um único canal de transmissão. Apresenta-se na Figura 15, uma topologia básica de um circuito multiplexador, cuja seleção de canais é comandada por um contador.

Figura 15 - Topologia básica de um multiplexador



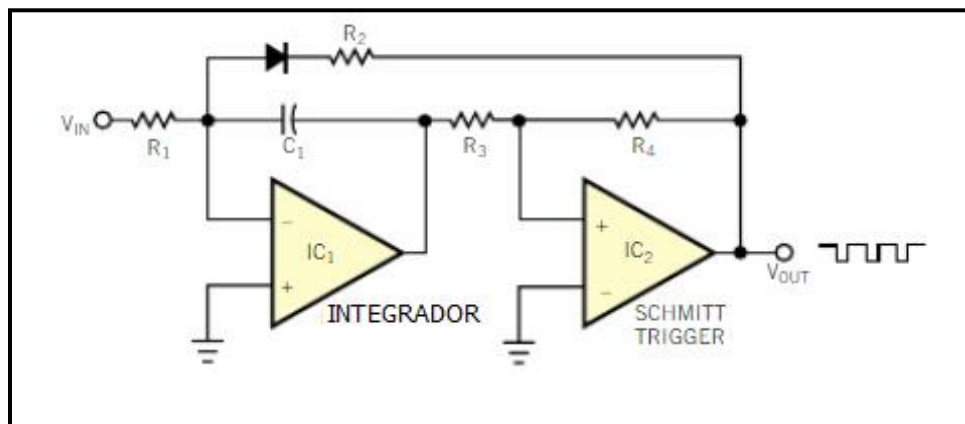
Fonte: [19].

O funcionamento do modelo de multiplexador da Figura 19 ocorre da seguinte forma: conta de 000 à 111 binário, ou seja, de 0 a 7 decimal. Como são 7 entradas, o contador vai selecionar uma por vez, no momento de cada descida do clock para ser enviada para a saída “S”. Em suma, nas 7 descidas do clock, as entradas  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$  e  $I_7$ , uma por vez, enviarão informações para a saída [19].

### 2.5.4 Conversor de tensão em frequência

O conversor de tensão em frequência é basicamente um conversor analógico-digital, mas que transforma o sinal analógico em uma sequência de pulsos digitais. Não se trata de um circuito elementar, já que é geralmente montado em circuitos integrados, e além de seus principais parâmetros de operações convencionais, deve-se estar atento à sua largura de banda de forma a estabelecer essa condição de contorno no desenvolvimento do projeto. A concepção básica de um circuito conversor de tensão em frequência é a combinação de um circuito integrador, que transforma a tensão de entrada em uma rampa e um circuito “Schmitt-trigger” que seta os limites desta rampa. Esse conjunto provê a oscilação em pulsos quadráticos proporcionais à tensão de entrada e também em função da frequência base do circuito [21]. O conversor de tensão em frequência básico é ilustrado pela Figura 16.

Figura 16 – Conversor tensão em frequência



Fonte: [21].

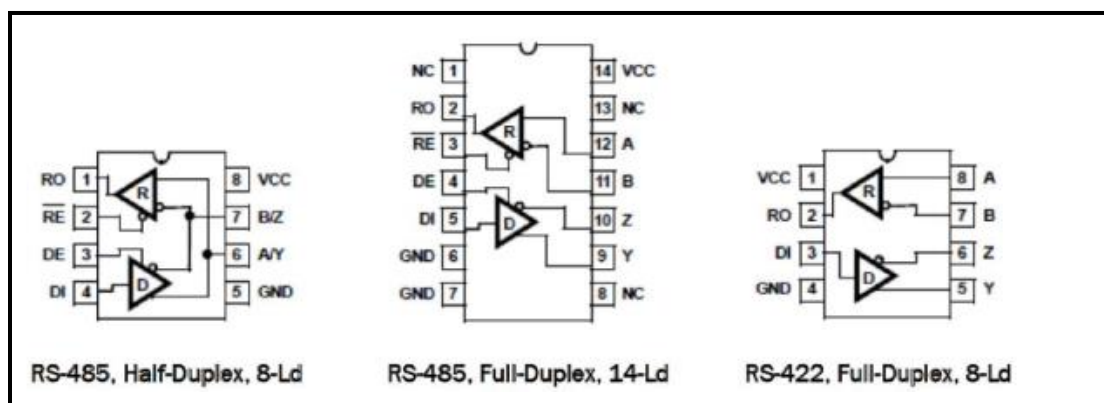


## 2.5.6 Interface RS 485

O RS-485 é um padrão de interface de comunicação utilizado para transmitir dados por longas distância, pois mitiga o ruído durante a transmissão. Para isso, usa como princípio a diferença de sinais com o propósito de atenuar o ruído do sinal de entrada e evitar que o ruído de modo comum interfira nas comunicações durante o tráfego do sinal [22]. No presente trabalho, esse padrão de interface será usado como repetidor da transmissão do sinal, de modo a evitar que o mesmo se degrade ao longo da transmissão.

Pode ser configurado para trabalhar como receptor, transmissor ou transceptor. É vendido em circuitos integrados comerciais que podem ser do tipo Half-Duplex: transmite e recebe informações de modo não simultâneo ou Full-Duplex: transmite e recebe informações de modo simultâneo [22]. Alguns dos modelos básicos deste circuito integrado estão representados na Figura 17.

Figura 17 – Modelos básicos do RS-485



Fonte: [22].

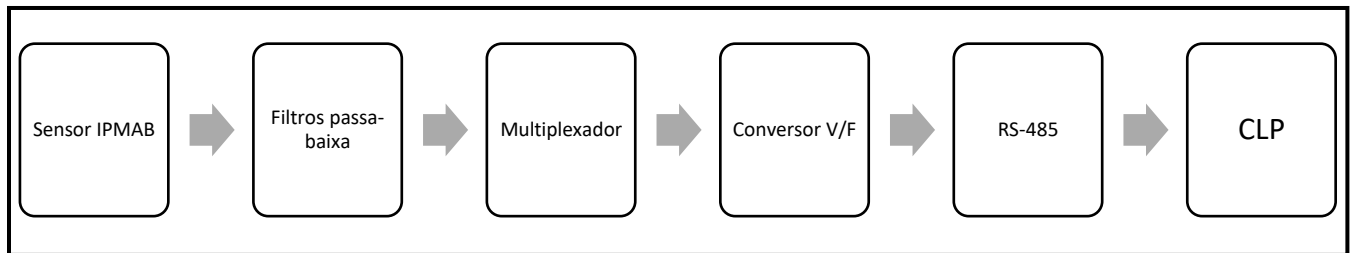
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo, abordam-se os materiais e métodos que são utilizados para se atingir o objetivo proposto no trabalho. Para tanto, este se divide em duas seções. A primeira descreve os principais componentes do circuito, já a segunda diz respeito à montagem de blocos funcionais a partir desses componentes, os quais são descritos abaixo de maneira sucinta. A função que cada componente exerce dentro do circuito está descrita abaixo.

- a) Sensor IPMAB – Detecta a posição das barras de controle e converte em tensão analógica equivalente;
- b) Filtro Passa-Baixa – Recebe a tensão de cada sensor IPMAB. Elimina ruídos de alta e média frequência, tanto os que são originados do chaveamento das chaves magnéticas quanto os que ocorrem por irradiação magnética e descarga elétrica no condutor;
- c) Multiplexador – Recebe os sinais filtrados. Cada multiplexador recebe 21 sinais, possibilitando o monitoramento desses sinais em um único canal de saída. A varredura é possibilitada por meio de um contador assíncrono de 8 bits ligado aos canais de seleção;
- d) Conversor V/F (LM331) – Faz a conversão analógica-digital por meio de pulsos. Diminuindo a probabilidade de interferência por irradiação eletromagnética;
- e) RS 485 – Recebe os pulsos do conversor V/F e os transmite para o controlador lógico programável (CLP);
- f) CLP – recebe os pulsos do RS-485 e por meio de software, fornece a saída para interface homem-máquina (IHM); e
- g) Contador – Tem a função de realizar a varredura dos canais do multiplexador.

Cabe lembrar que o trabalho é basicamente qualitativo, e para fortalecer tal sugestão, avalia componentes a serem adquiridos; propõe metodologia de instrumentação; e faz uso de software de simulação para analisar a eficiência de sua proposta. A interligação dos componentes mencionados é representada pela Figura 18.

Figura 18 – interligação dos componentes do circuito de indicação de posição das barras de Controle



Fonte: própria

### 3.1 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES DO CIRCUITO

Esta seção descreve os componentes comerciais sugeridos na utilização no circuito do indicador de posição das barras de controle. A abordagem genérica da lógica do circuito desses componentes foi feita no capítulo 2, este subcapítulo, por sua vez faz uma abordagem mais específica, enfatizando as características técnicas de cada um.

Para escolha dos componentes do circuito, foram julgados como essenciais, parâmetros, tais como:

- a) Resistência à radiação para resistores e capacitores. Já que a radiação causa efeitos permanentes em materiais de mica e cerâmica, alterando a resistência destes componentes [23]. Nos capacitores, altera permanente as propriedades dielétricas. Em componentes como circuitos integrados, tal propriedade gera benefício, embora não seja condição essencial para operação na proximidade de reatores, visto que certos componentes eletrônicos são capazes de executar uma operação confiável num ambiente nuclear de severidade moderada [23];
- b) Operação em temperaturas acima de 100°C;
- c) Operar com fonte de baixa de tensão, em torno de 5 a 24 V em corrente contínua;
- d) Para componentes que trabalham com frequência (conversor V-F), possuir rapidez (baixo tempo de transiente) e suportar altas frequência (100 kHz); e
- e) Alta confiabilidade.

### 3.1.1 Sensores IPMAB

De acordo com Póvoa (2017, p.1) [24], “[...] O IPMAB é um equipamento que foi desenvolvido com o objetivo de medir a posição das barras de controle e segurança do reator, indicando a posição absoluta das barras, transmitindo os sinais de posição para o sistema de controle. [...]”

Ainda segundo Póvoa (2017) [24], “[...] Cada IPMAB (Indicador de Posição do MAB) consiste de placas com componentes eletrônicos e cabos que permitem a realização da detecção da posição de um conjunto (ímã permanente / concentrador magnético) interno ao tubo de contenção, com o objetivo de realizar a medição da posição das hastes internas deste tubo. [...]”

O sistema é composto de 84 sensores com redundância quádrupla (4 em cada dos 21 tubos de contenção). Esses são do tipo chave magnética (*Reeds Switches*) [24], cujo concepção básica exposta pelo trabalho de Yu (2007) [16] está exposto na Figura 8, no capítulo 2. Contudo, a placa de circuito impresso do IPMAB (Anexo A) possui valores de resistores diferentes (10Ω, 100Ω e 10 kΩ), adaptados aos requisitos de projeto do mecanismo de acionamento de barras do reator do LABGENE.

Como visto anteriormente, no Capítulo 2, o circuito da Figura 8 indica a posição da barra por meio de uma tensão analógica equivalente a sua posição no tubo guia, por meio da divisão da tensão de alimentação, conforme equação (5).

$$V_o = \frac{R_a + R_c \cdot SN}{R_a + R_b + 35xR_c} \cdot V_{in} \quad (5)$$

De onde:

$V_{in}$  : Tensão de entrada

$V_o$  : Tensão de saída

$R_a$  : Resistor (100 Ω)

$R_b$  : Resistor (100 Ω)

$R_c$  : Resistor (10 Ω)

$SN$  : número do passo do sistema (varia de 0 à 82)

Os dados entre parêntesis são do circuito impresso do IPMAB. Em suma, pode-se dizer que os parâmetros de resistência são variáveis conforme o projeto, e o valor de SN varia conforme a posição das barras de controle. O parâmetro “ $35xR_c$ ” também pode variar.

Em relação aos componentes passivos, os resistores utilizados para montar o circuito possuem valores comerciais e são resistentes à radiação. Para o supracitado projeto, a escolha das chaves magnéticas como equipamento de instrumentação possui certas vantagens, as quais são descritas abaixo [25]:

- a) Não precisam de fornecimento de corrente para funcionar;
- b) Altamente econômica;
- c) Chaveamento altamente confiável;
- d) Baixa impedância de contato ( $0.07$  à  $2\Omega$ );
- e) Contatos protegidos das condições adversas do meio ambiente; e
- f) Dispensa mínima corrente de chaveamento.

Ademais, deve-se ter o conhecimento que a utilização de chave magnéticas para cargas indutivas e capacitivas é desvantajosa [26]. No primeiro caso, a tensão induzida durante a abertura dos contatos pode danificar a estrutura do componente; No segundo, os contatos podem ser submetidos à altos picos de corrente [26]. Felizmente, o circuito de indicação de posição das barras é predominantemente resistivo, contudo, deve-se ter cuidado ao projetar o tamanho do cabo, uma vez que longos cabos acarretam em cargas indutivas e capacitivas.

O modelo da chave magnética usada foi o modelo HSR-196W. Cujas características estão expressas na Tabela 3.1

Tabela 3.1 – Características da chave magnética modelo HSR-196W [26]

Material	Ródio
Máxima potência no chaveamento	200 W
Máxima tensão no chaveamento	120 VDC
Máxima corrente no chaveamento	4 A
Mínimo valor de Drop Out	6
Tensão de Breakdown	700 VDC
Mínima resistência de isolamento	$10^{10}$ ohms

Tempo de atuação	1,1 ms
Temperatura de operação	-40 até 125°C

Fonte: [26]

Assim sendo, conclui-se que o IPMAB possui características confiáveis, imprescindíveis aos meios de instrumentação designados para trabalhar em ambiente nuclear [27]. Suas características operacionais estão inseridas nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4.

Tabela 3.2 – Condição normal de operação

Temperatura (°C)	60
Pressão (bar)	1,0
Umidade Relativa (%)	20-70
TID (Rad)	1000

Fonte: [24]

Tabela 3.3 – Condição de acidente

Temperatura (°C)	155
Pressão (bar)	5,5
Umidade Relativa (%)	100
TID (Rad)	8000000

Fonte: [24].

Tabela 3.4 – Características do sensor

Alimentação	5VCC
Saída	0 VCC – Sem ímã 0.5 à 4.5VCC – variação de tensão conforme a posição do ímã
Resistência Ôhmica	1kohm – entre positivo e negativo Circuito aberto – entre negativo e sinal Circuito aberto – entre positivo e sinal
Interligação	3 fios – positivo, negativo e sinal

Fonte: [24].

O sensor IPMAB terá um sinal que tráfegará por um cabo, exposto à variações de temperatura, radiação, vibração e interferência eletromagnéticas. Destarte, será imprescindível que o tratamento do sinal seja o mais confiável e robusto possível [24].

### 3.1.2 Filtros passa-baixa

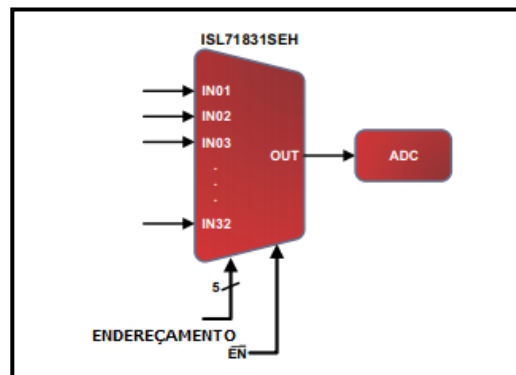
Para construção do filtro passa-baixa serão utilizados dois componentes: Um resistor de 100 k $\Omega$  e um capacitor de 240 nF, ambos de valores comerciais e resistentes à radiação.

### 3.1.3 Multiplexador ISL71831SEH

O Multiplexador analógico ISL71831SEH é fabricado pela empresa Intersil Corporation. Possui 32 canais de entrada selecionáveis a partir de linhas de endereçamento de 5 bits e é resistente a radiação [28]. O componente é projetado para o *Cold Sparring*, evento onde um equipamento perde seus ajustes ou configurações após falha no sistema, tornando o componente ideal para operações onde se necessita alta confiabilidade. Em relação à segurança e economia, O ISL71831EH possui proteção contra sobretensão na entrada e provê alta impedância para a fonte analógica quando desligado [28].

A Figura 19 mostra o bloco funcional deste componente.

Figura 19 – Bloco Funcional do Multiplexador ISL71831EH



Fonte: [28].

Dentre as características mais importantes deste dispositivo, podem ser citadas [28]:

- Funciona com tensão entre 3V e 5V corrente contínua;
- Fabricado com tecnologia SOI (Silicon on Insulator), que é resistente ao

*latch-up*, evitando correntes parasitas e eventuais curto-circuitos no componente;

- c) Tempos de transição: 70ns;
- d) Tolerância à radiação: 75krad (Si), na taxa de evolução de 0.01 rad (Si)/s; e
- e) Temperatura de operação: -55°C até 125°C.

### 3.1.4 LM331

Para converter tensão para frequência, foi escolhido para este trabalho o Circuito integrado LM331 da *National Semiconductcor*. As principais vantagens desse em relação aos outros fabricantes é a possibilidade de montagem de circuitos mais simples, com menor número de componentes, embora com menor alcance em frequência. Pode operar com alimentação baixa (4V corrente contínua) e transforma a tensão numa frequência proporcional equivalente entre 1Hz e 100KHz [29].

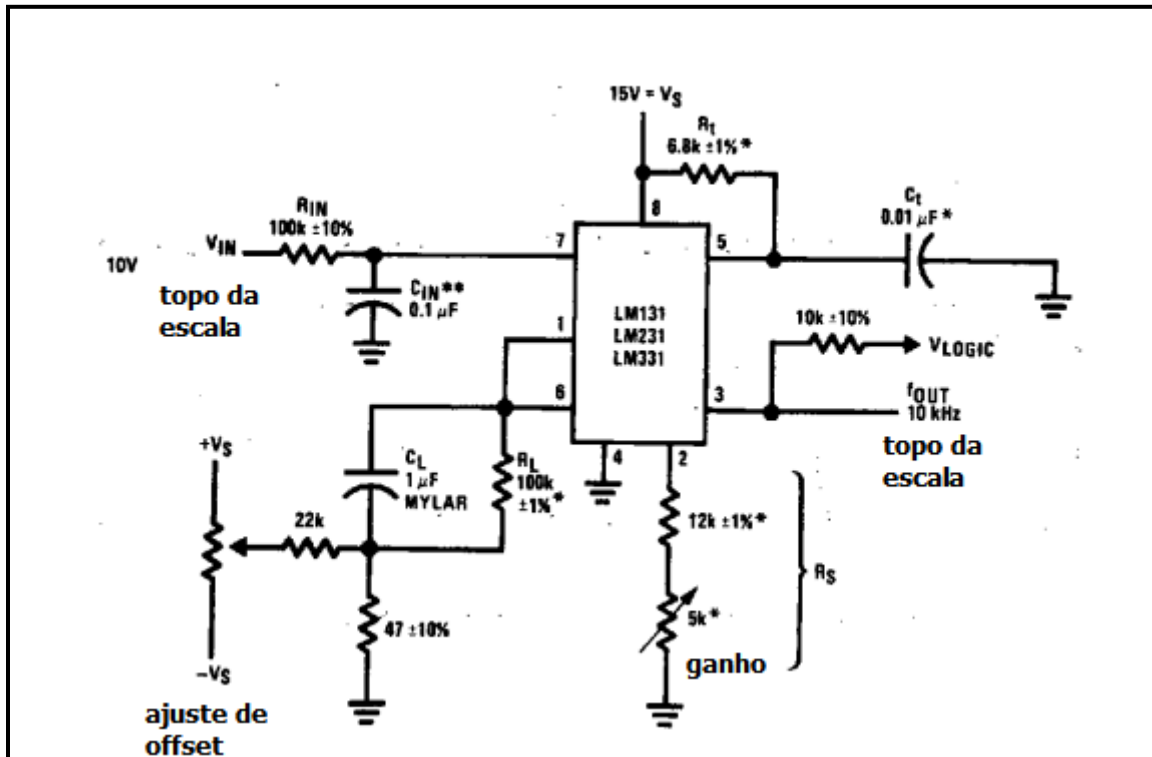
As principais características do LM331 estão relacionadas abaixo [29]:

- a) Garantia de linearidade: máximo 0,01%;
- b) Dissipação de baixa potência: 15mW;
- c) Largura de banda: 1kHz até 100kHz;
- d) Saída de pulsos compatíveis com todas as formas lógicas; e
- e) Largura de alcance dinâmico: 100dB mínimos na frequência de 10 KHz.

As demais características do LM331, como o circuito interno e especificações técnicas, estão no Anexo B. Foi escolhida uma configuração simples do LM331 como conversor de tensão para frequência conforme montagem do circuito da Figura 20.



Figura 20 – Configuração do LM331 como conversor de precisão de tensão em frequência



Fonte: [29].

### 3.1.5 RS-485 DS16F95QML

O DS16F95QML é um circuito integrado monolítico bidirecional que atua na interface EIA/RS-485, fabricado pela empresa Texas Instrument, que tem como principais características [30]:

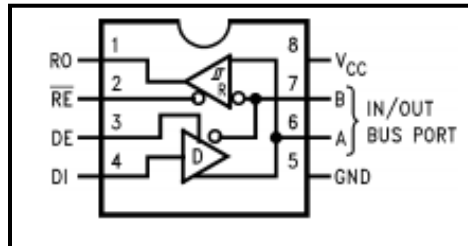
- Consumo de potência reduzido (300 mW no driver e 80 mW no receptor);
- Permite até 32 transceptores no barramento;
- Projetado para transmissões multiponto;
- Opera com uma fonte de 5V;
- Alta impedância na entrada do receptor (10 kΩ);
- Temperatura de operação: -55°C até 125°C; e
- Desligamento térmico.
- Suporta nível de radiação até 300 krad (Si)

O componente atua no circuito para manter a estabilidade do sinal ao longo da transmissão até o CLP. Suas características permitem que isso se dê de forma confiável

e com mínima degradação e geração de ruído [30].

A Figura 21, apresenta a configuração de pinos deste componente.

Figura 21 – Configuração de Pinos do DS16F95QML



Fonte: [30].

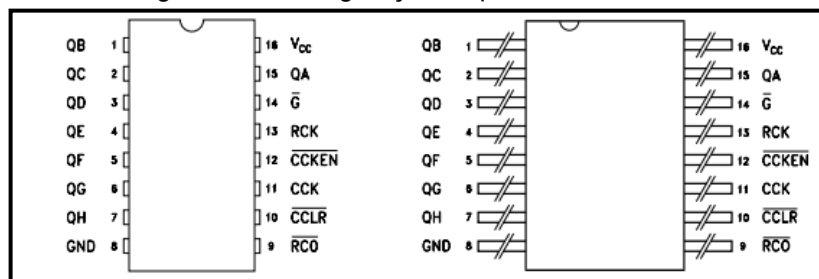
### 3.1.6 Contador assíncrono M54HC590

Para realizar a seleção dos canais no multiplexador utiliza-se o M54HC590, que é um circuito integrado com a função dual de ser um contador/registrador de 8bits com tecnologia C<sup>2</sup>MOS fabricado pela *STMicroelectronics* [31]. Este tem como principais características [31]:

- Alta imunidade ao ruído;
- Atrasos de propagação balanceados;
- Impedância simétrica de saída;
- Opera com uma fonte de 2 a 6V corrente contínua;
- Frequência máxima: 61 MHz a 6V corrente contínua;
- Temperatura de operação: -55°C até 125°C; e
- Suporta nível de radiação até 100 krad (Si)

A Figura 22, apresenta a configuração de pinos deste componente.

Figura 22 – Configuração de pinos do M54HC590

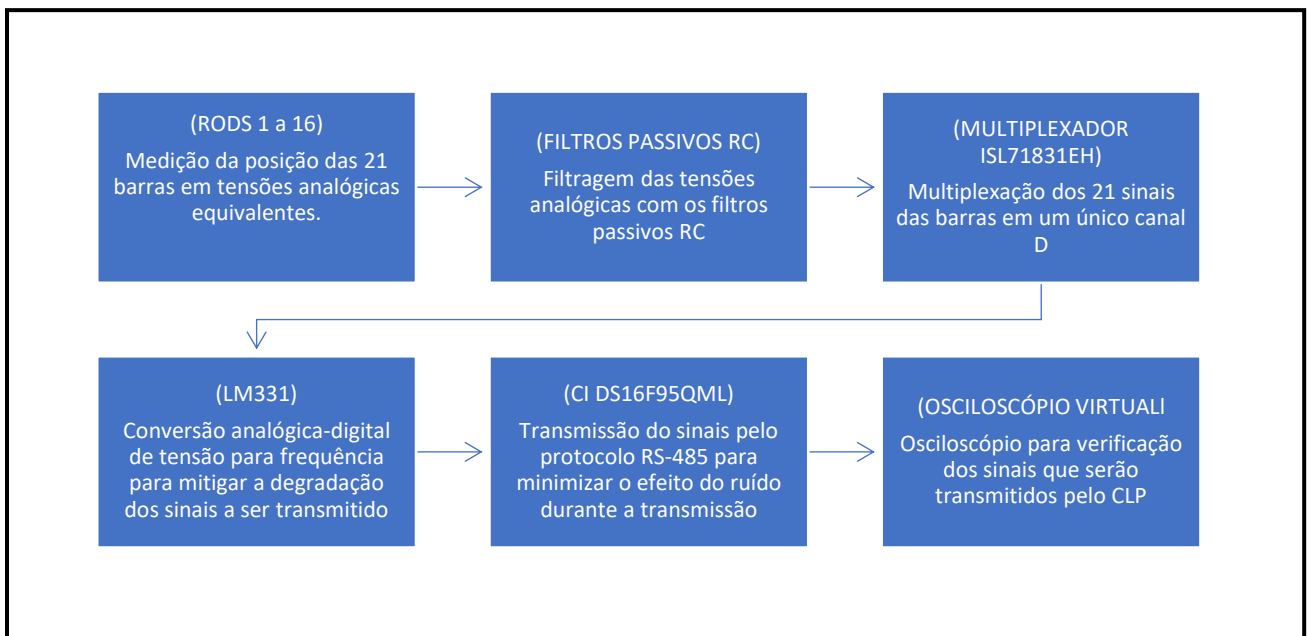


Fonte: [31]

### 3.2 MONTAGEM DO CIRCUITO

Esta seção trata da montagem dos componentes em blocos funcionais feita no *software* ISIS PROTEUS. O esquemático completo pode ser visto no Anexo C. Cada subcapítulo dessa seção se dedica a descrever a função de cada bloco funcional e, quando necessário, explicar sua relação com os demais. O fluxograma da Figura 23 os processos de cada uma das etapas e o componente principal de cada uma delas.

Figura 23 – Fluxograma dos processos do circuito



Fonte: própria

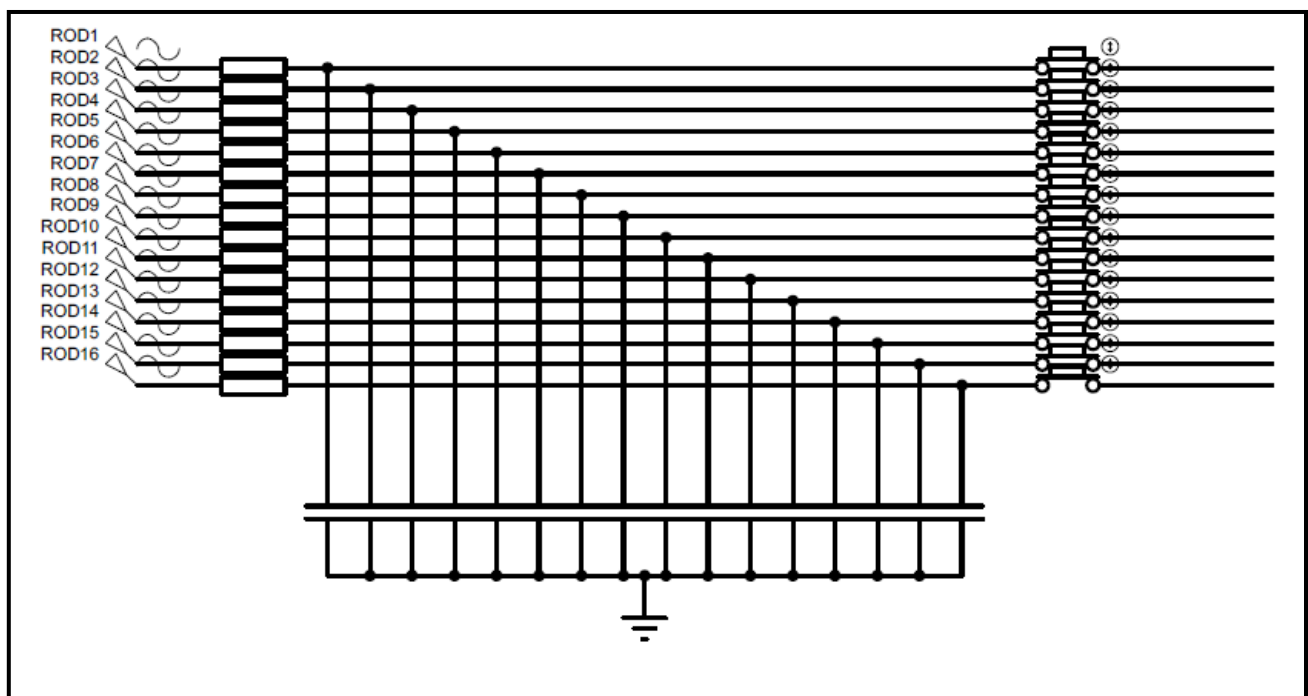
#### 3.2.1 Instrumentação e Filtragem

Os IPMAB's transformam a variável de posição das barras de controle em tensões analógicas conforme a Equação 5, sendo os limites equivalentes à mínima e à máxima inserção, 0.5V e 4.5V corrente contínua, respectivamente. O IPMAB pode monitorar 83 posições da barra (0 à 82). Dessa forma, a posição da barra de controle e segurança indicará um valor de tensão na faixa de 4V (entre 0.5V e 4.5V), resultando num passo de tensão de, aproximadamente, 0,049V a cada incremento de posição.

Na simulação do IPMAB no *software* ISIS PROTEUS foram colocadas fontes de

tensão contínua, como forma de indicar, de maneira equivalente, a posição das barras de controles. O sistema completo possui 84 conjuntos de sensores que monitoram 21 barras, contudo, devido a limitações das entradas do modelo de multiplexador do programa, simulou-se 21 barras em 16 canais, cujas posições resultam em tensões variando entre 0.5 e 4.5V. Portanto, foram criadas no *software* ISIS PROTEUS, 16 tensões nomeadas de “ROD’S” (Figura 24).

Figura 24 – Circuito de instrumentação e filtragem



Fonte: própria

As tensões chamadas de “ROD’S” simulam a indicação da posição das barras. Na Tabela 3.5 consta a lista de todas as posições das 21 barras e tensões equivalentes.

Tabela 3.5 – Sinais de tensão das barras de controle

Sinal de Tensão	Barras de controle físicas	Situação
ROD 1	Barra 1, Barra 2, Barra 3, Barra 4, Barra 5 e Barra 6	0.5V – Não inseridas
ROD 2	Barra 7	1.5V – Inseridas parcialmente/ Baixo Controle
ROD 3	Barra 8	1.5V – Inseridas parcialmente/

		Baixo Controle
ROD 4	Barra 9	1.5V – Inseridas parcialmente/ Baixo Controle
ROD 5	Barra 10	1.5V – Inseridas parcialmente/ Baixo Controle
ROD 6	Barra 11	2.5V – Inseridas parcialmente/ Médio Controle
ROD 7	Barra 12	2.5V – Inseridas parcialmente/ Médio Controle
ROD 8	Barra 13	2.5V – Inseridas parcialmente/ Médio Controle
ROD 9	Barra 14	2.5V – Inseridas parcialmente/ Médio Controle
ROD 10	Barra 15	4.5V – Inseridas Totalmente/ Alto Controle
ROD 11	Barra 16	4.5V – Inseridas Totalmente/ Alto Controle
ROD 12	Barra 17	4.5V – Inseridas Totalmente/ Alto Controle
ROD 13	Barra 18	4.5V – Inseridas Totalmente/ Alto Controle
ROD 14	Barra 19	4.5V – Inseridas Totalmente/ Alto Controle
ROD 15	Barra 20	4.5V – Inseridas Totalmente/ Alto Controle
ROD 16	Barra 21	4.5V – Inseridas Totalmente/ Alto Controle

Fonte: própria

A tabela demonstra a convenção utilizada neste trabalho: 6 barras não acionadas, 4 barras com pouco comprimento inserido, 4 barras inseridas numa posição intermediária e 7 completamente inseridas. Obviamente que existem diversas configurações para o posicionamento das barras, contudo, a adotada é suficiente aqui. Cabe ressaltar que estes valores fixos de tensão representam cada barra imóvel. Valores de tensão variável, como uma fonte linear, senoidal, cossenoidal, triangular, retangular, dentre outras, representariam a barra em movimento, mas não é o foco deste trabalho. Por outro lado,

tal ideia surge como indicação para futuros trabalhos no Capítulo 5.

Na Figura 23, verifica-se a simbologia de uma fonte alternada. Isso ocorre porque para simular o sinal de ruído na instrumentação, foi adicionada uma tensão alternada de 0.5V e 10 kHz de frequência. Portanto, cada sinal “ROD” é uma fonte de corrente alternada com nível CC exposto na Tabela 3.5 mais o sinal CA de amplitude +0.5V com frequência de 10 kHz para representar o ambiente ruidoso e as descargas eletrostáticas.

Para filtrar o ruído, foi projetado um filtro passivo para cada linha de sinal, cujo corte deriva-se dos componentes utilizados: Um capacitor de 240nF e um resistor de 10kΩ, conforme Equação 6, logo abaixo:

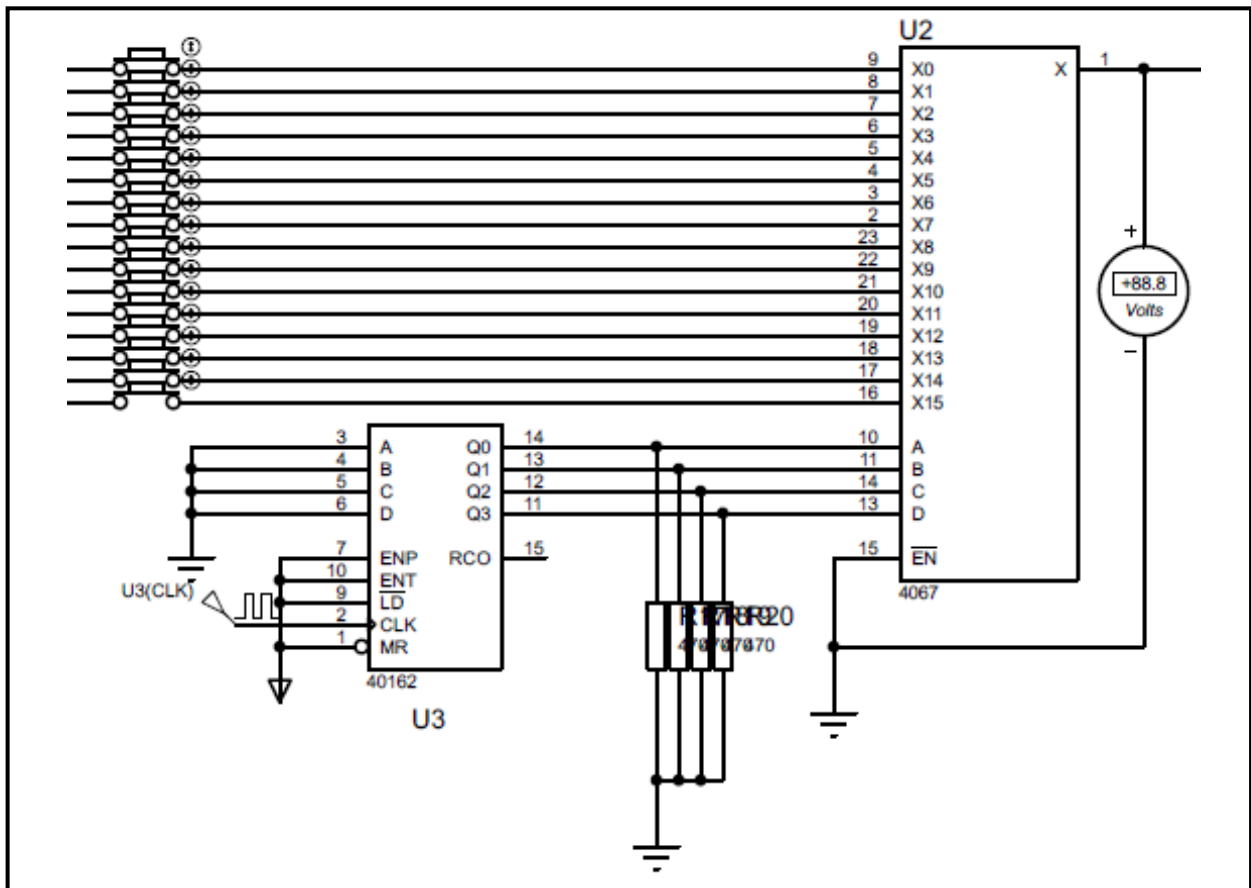
$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi 10 \times 10^3 \Omega \times 240 \times 10^{-9}} = 66,35 \text{ Hz} \quad (6)$$

Verifica-se, portanto, que a tendência deste filtro é barrar o ruído que tem frequência muito superior à projetada e permitir a passagem do sinal CC que tem frequência 0Hz.

### 3.2.2 Multiplexação

O Multiplexador escolhido para este trabalho tem possibilidade de chavear entre 32 canais. Contudo, o componente de maior número de entradas no software ISIS PROTEUS possui limitação de 16 entradas que são chaveadas por meio de um contador assíncrono. Este possui a vantagem de ter reinício automático, já que o bit de overflow do CARRY automaticamente reinicia a sequência. O circuito está exposto na Figura 25.

Figura 25 – Circuito do Multiplexador



Fonte: própria

O clock de entrada do contador é gerado pelo CLP, cuja frequência é 10kHz. A justificativa por esse método foi devido ao fato de que, utilizando o próprio sinal de saída do conversor LM331, ter-se-ia um clock variável, que prejudicaria a seleção dos canais do multiplexador.

Pode ser visto ainda no circuito mais dois elementos: os botões em série com cada sinal de tensão e o voltímetro. O primeiro permite uma análise separada do comportamento de cada sinal, e o segundo constatar se a seleção do canal de cada ROD foi atendida. De modo geral, esses dois elementos auxiliam na avaliação do funcionamento do circuito.

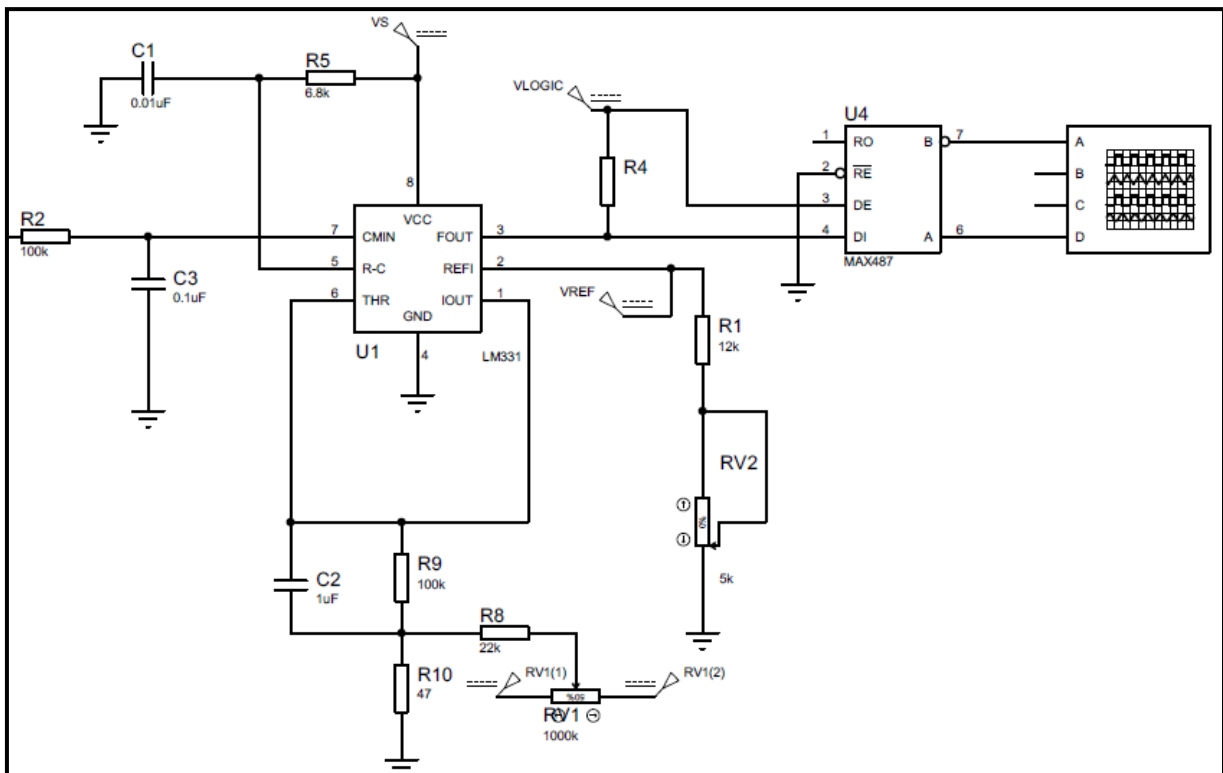
### 3.3 Conversão em frequência e transmissão

A saída do multiplexador é conectada ao conversor tensão-frequência (LM331) pelo resistor R2. A entrada no pino 7 exige uma prévia filtragem para conexão no pino 7 do LM331 (componente U1). O circuito de disparo com é regulado por meio do reostato RV1 e a frequência pode ser ajustada por meio do reostato RV2. O circuito funciona como uma tensão  $V_S = 15V_{CC}$  e um  $V_{LOGIC} = 5V_{CC}$ . A Equação 7 fornece a função de transferência de conversão de tensão em frequência dessa configuração do LM331.

$$F_{out} = \frac{V_{2in} (R_{V2} + R_1)}{2.09 \times R_9} \frac{1}{R_5 C_1} \quad (7)$$

A saída em frequência é conectada ao componente U4, um transmissor RS-485, que envia o sinal para o osciloscópio. Esse por sua vez faz a análise dos sinais transmitidos para o CLP. A Figura 26 descreve todo o circuito desta subseção.

Figura 26 – Circuito de conversão e transmissão



Fonte: própria



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo aborda os resultados da simulação do circuito em cada uma das etapas supracitadas no capítulo 3, demonstrando o cumprimento dos objetivos de cada uma. Ademais, são feitas discussões acerca dos resultados obtidos.

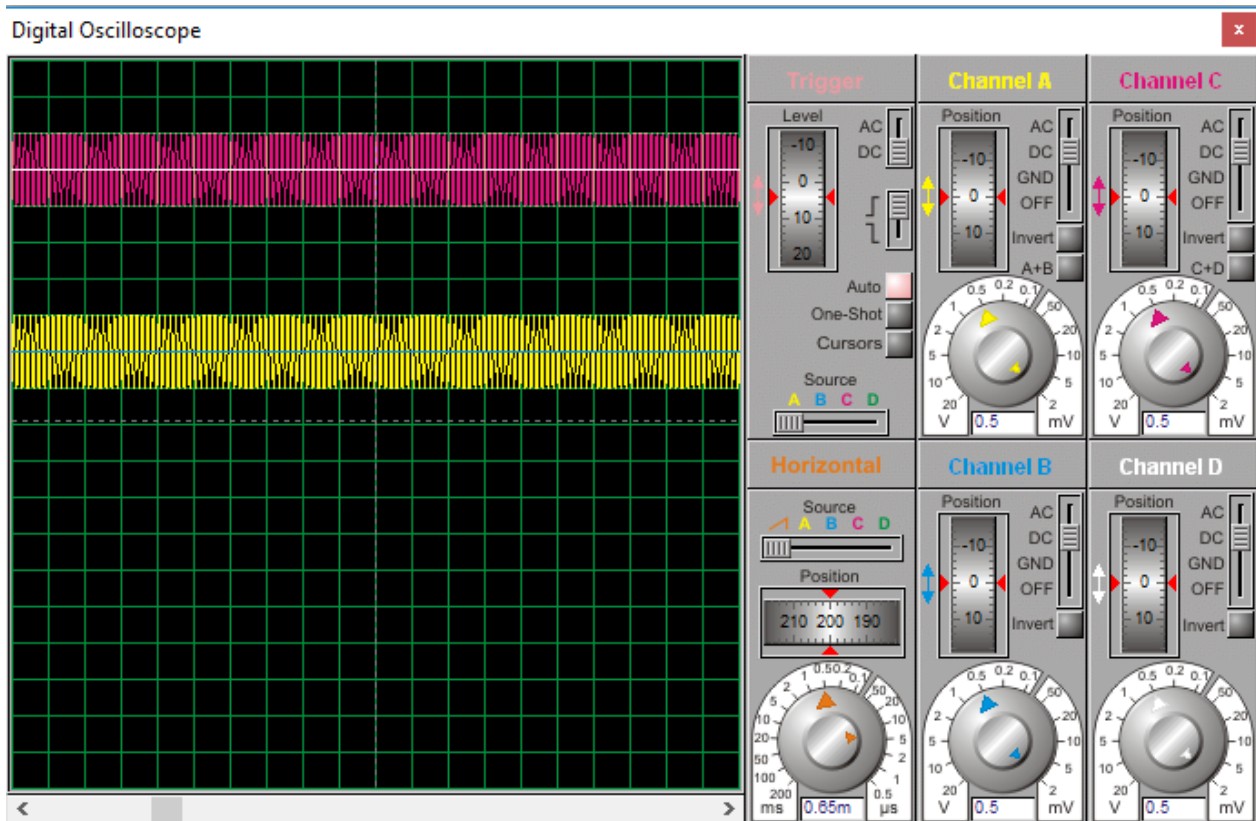
### 4.1 RESULTADOS DA FILTRAGEM

Para verificar a eficiência da filtragem dos 16 sinais, foi selecionada uma amostragem de filtragem de dois destes (ROD 1 e ROD 7), cujos resultados foram apresentados por meio de quatro canais do osciloscópio virtual do ISIS PROTEUS:

- a) Canal A (Amarelo) – Entrada do filtro conectado ao sinal “ROD 1 (1V CC e 0,5V CA, frequência de 10Khz)”;
- b) Canal B (Azul) – Saída do filtro conectado ao sinal “ROD 1 (1V CC e 0 V CA)”;
- c) Canal C (Rosa) – Entrada do filtro conectado ao sinal “ROD 7 (4V CC e 0,5 CA, frequência de 10Khz)”;
- e
- d) Canal D (Branco) – Saída do filtro conectado ao sinal “ROD 7 (4V CC e 0 V CA)”.

Os canais B e D mostram os resultados da filtragem dos ruídos nos sinais ROD 1 e ROD 7, respectivamente, cuja frequência de corte, já representada pela Equação 6, é de 66,35 Hz. Tais resultados estão graficamente representados pela Figura 27.

Figura 27 – Resultados da filtragem dos sinais ROD7 e ROD1



Fonte: própria

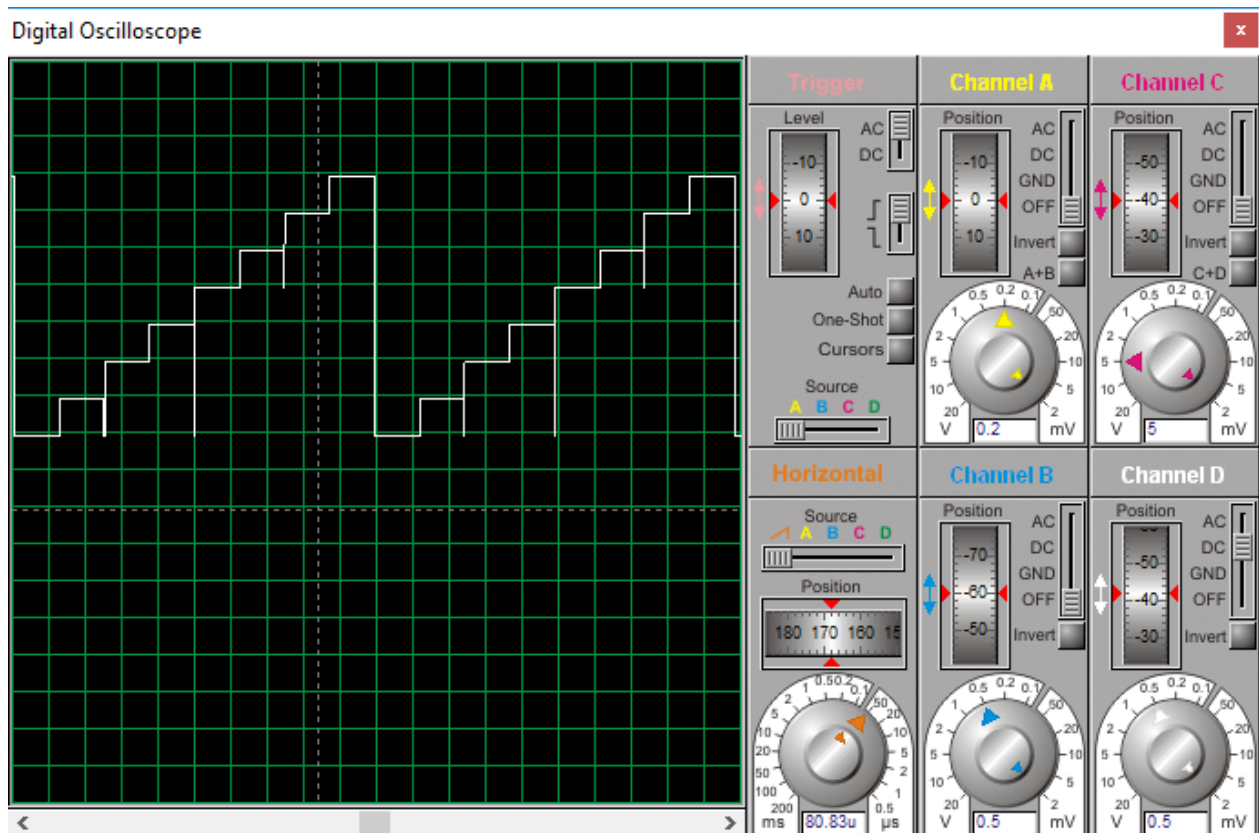
A escala selecionada para todos os canais foi de 0,5V cada quadrícula. A partir da observação da Figura 27, nota-se a filtragem do ruído dos dois sinais sem qualquer tipo de perda.

#### 4.2 RESULTADOS DA MULTIPLEXAÇÃO

O canal D do osciloscópio virtual do PROTEUS foi usado para medir o sinal de saída do multiplexador. Este deve assumir cada um dos valores dos 16 sinais de medição da posição das barras de controle (ROD1 ao ROD16) na frequência determinada pelo clock do CLP que controla o contador que está ligado aos canais de seleção do multiplexador. O princípio básico do multiplexador é o monitoramento simultâneo dos 16 sinais que indicam a posição das barras. Para tanto, a frequência de alteração dos canais deve ser tal que os olhos de quem está operando não perceba a mudança, o que justifica o emprego de alta frequência do chaveamento de canais (10 kHz). Outro princípio que

deve ser atendido é a igualdade do tempo de monitoramento de cada um dos sinais. Os resultados obtidos demonstram o atendimento de ambos os princípios, que pode ser visto em forma de gráfico (resultante da medição do canal D do osciloscópio virtual do Proteus) na Figura 28.

Figura 28 – Resultados da Multiplexação



Fonte: própria

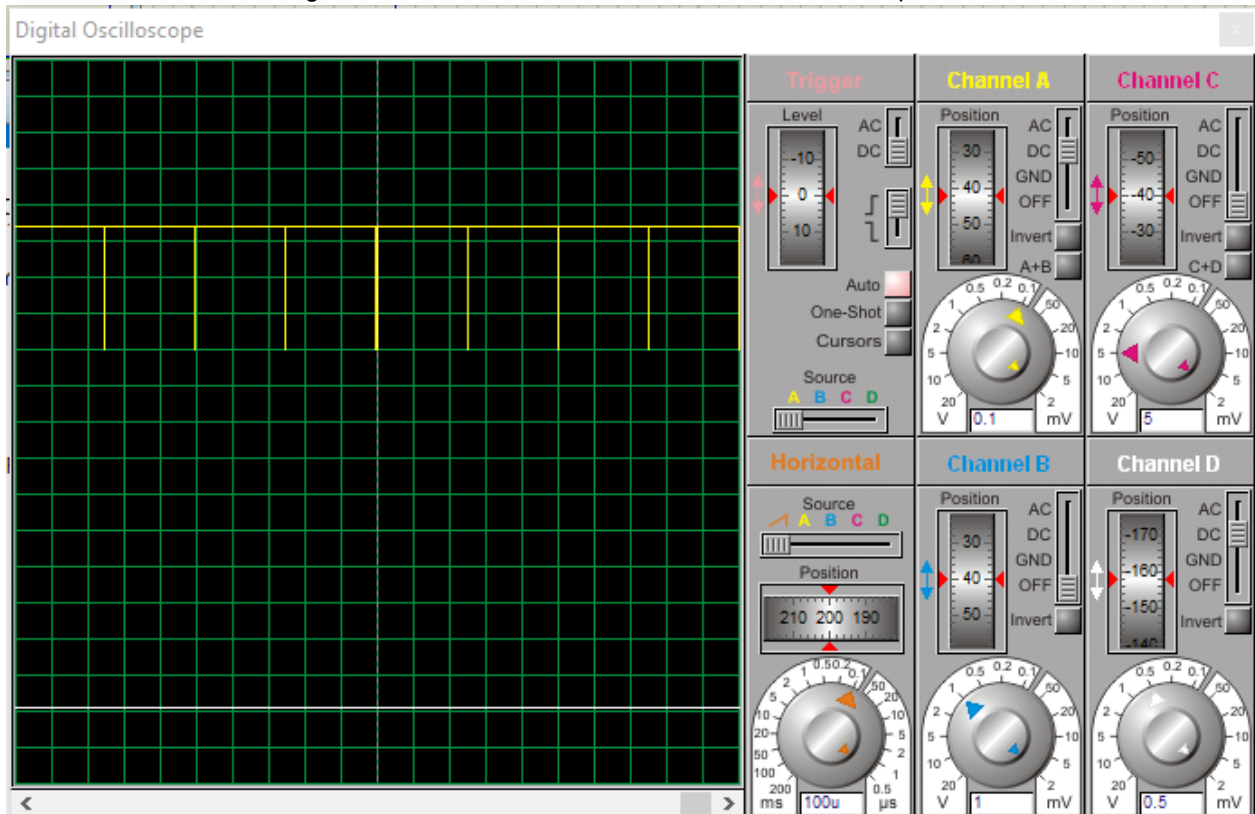
Portanto, a simulação da Figura 28 demonstra que os 16 sinais (ROD 1 a ROD16) tem um tempo de seleção de 100us cada. A alta frequência minimiza o efeito do transiente entre um sinal e outro, o que é desejável para esse tipo de operação, haja vista que caso contrário, a leitura da posição da barra seria prejudicada.

#### 4.3 RESULTADOS DA CONVERSÃO TENSÃO-FREQUÊNCIA

Foi usado o osciloscópio virtual do *software* ISIS PROTEUS para coletar os

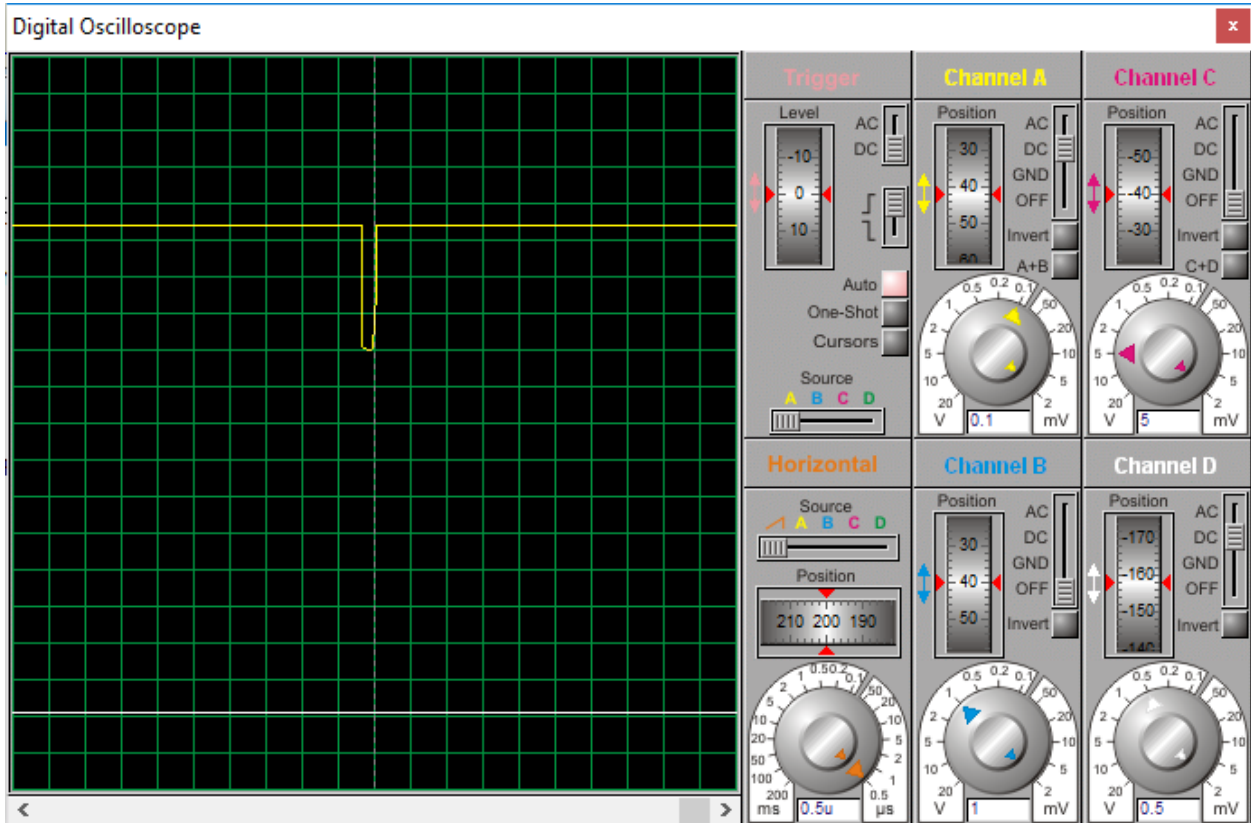
resultados da conversão de tensão para frequência da simulação desta etapa. A forma de onda desta conversão está representada pelas Figura 29 e Figura 30.

Figura 29 – Sinal de saída da conversão tensão-frequência



Fonte: própria

Figura 30 – Visão aproximada da forma de onda



Fonte: própria

Espera-se, portanto, dessa etapa, a transformação da tensão resultante da instrumentação da posição das barras em um sinal de frequência proporcional a essa tensão, conforme a Equação 7 (modelo da *National Semiconductor*). Substituindo as variáveis da equação pelos valores correspondentes do circuito da Figura 20, gera a Equação 8, abaixo, que representa a relação de conversão tensão-frequência do modelo de LM331 escolhido para este trabalho.

$$F_{out} \cong 844 \times V_{2in} \quad (8)$$

Foi preciso ajustar a simulação de modo a corrigir as divergências tanto na frequência de saída de conversão, como no *Duty-Cicle* (relação entre período no estado alto e estado baixo) do sinal de saída. Isto ocorreu devido às seguintes causas:

- O modelo de LM331 disponível no PROTEUS é diferente do modelo da *National Semiconductor*;

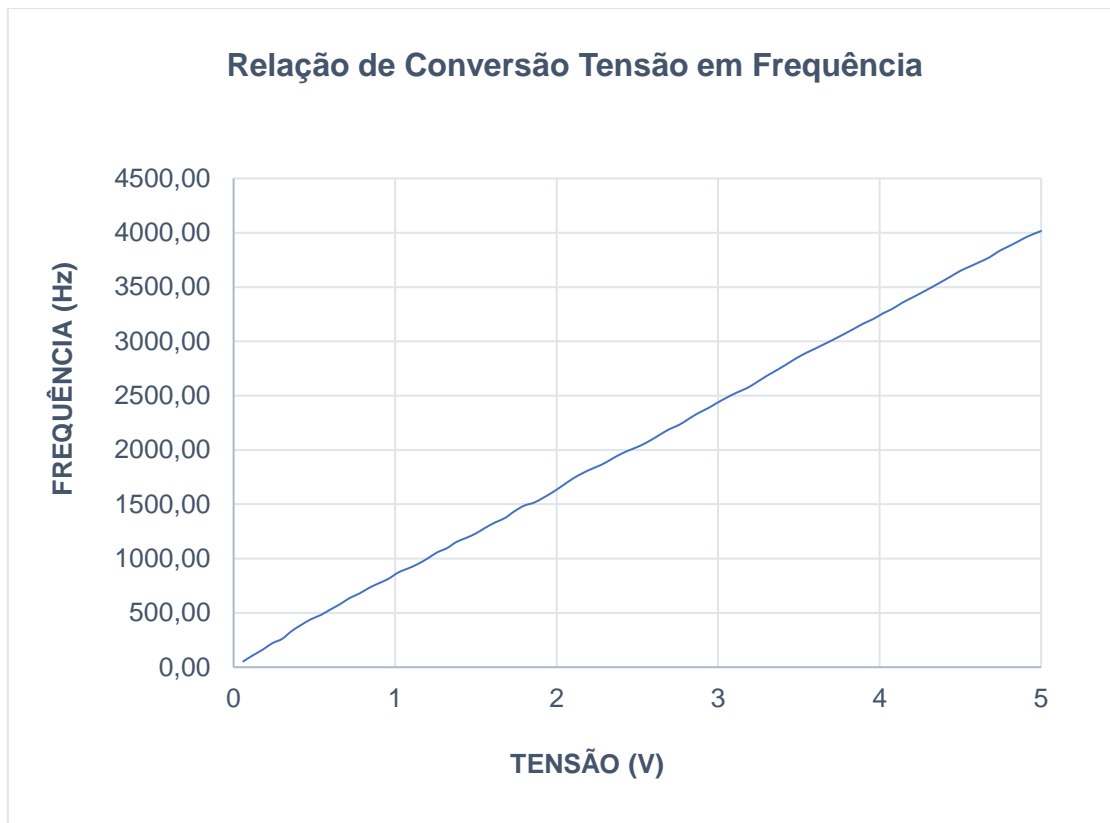
- b) Para que se atinja a equação, uma complexa gama de fatores deve ser satisfeita, a qual não pode ser satisfeita via simulação, tal como a estabilidade de componentes passivos, como capacitores e resistores; e
- c) A velocidade da simulação extrapola por vezes o clock da máquina (2133MHz) fazendo com que a simulação não ocorra em tempo real.

As divergências no *duty-cycle* não causaram problemas, visto que, o objeto de interesse para a conversão é a proporcionalidade entre tensão de entrada e frequência na saída. Contudo, os valores de saída em frequência precisaram ser ajustados pela substituição do valor de 6.8k $\Omega$  do resistor R5 do circuito de conversão por 30 $\Omega$  para tornarem-se fidedignos ao modelo real. Tal ajuste foi necessário em vista dos problemas já elencados nos itens acima e foi obtido por tentativa e erro de substituição do resistor de 6.8k $\Omega$ , a partir verificação de proximidade dos valores de saída observados com os valores da frequência na saída da Equação 8.

Finalmente, foram aplicadas tensões entre 0 a 5V CC na entrada do conversor V/F, com passo de 0.06V CC entre elas, e observadas as saídas em frequências. Dessa forma, montou-se uma matriz de dados relacionando tensão e frequência (Anexo D) e, com base nela, foi gerado o Gráfico 1. Foi usada a função do WORD EXCEL 2013, "PROJ\_LIN", para descobrir a função do gráfico, aproximada pela Equação 9.

$$F_{out} \text{ (estimado)} \cong 812 \times V_{2in} \quad (9)$$

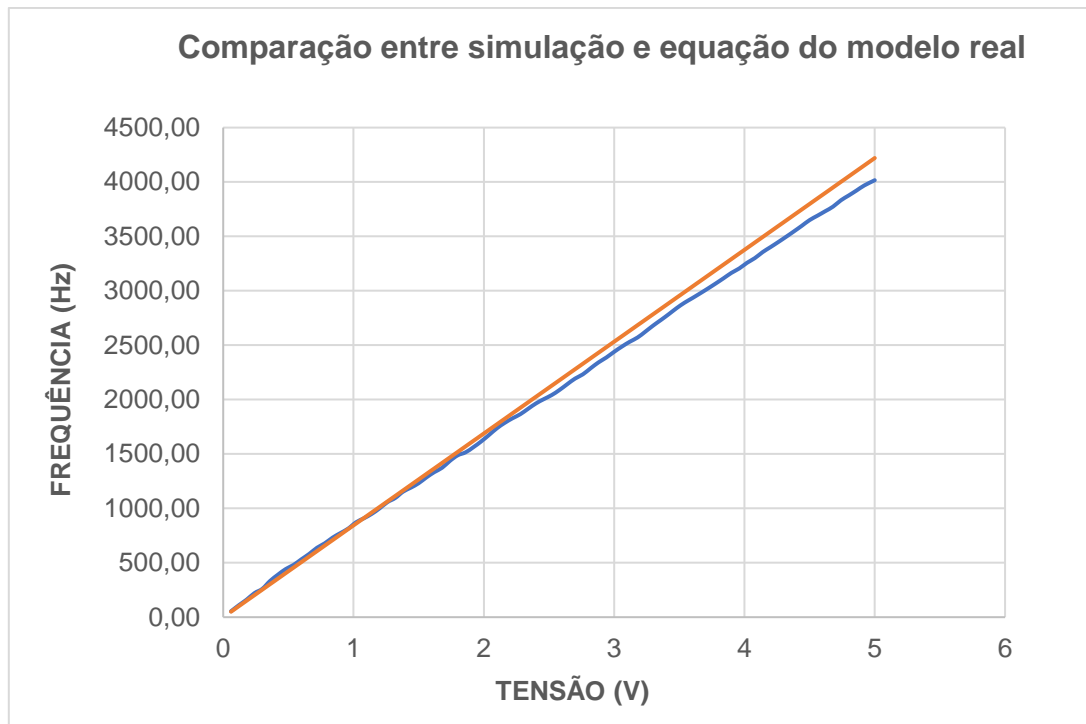
Gráfico 1 – Gráfico Tensão x Frequência da simulação



Fonte: própria

Correlacionando as Equações 8 e 9, obtêm-se um erro de 4%, aproximadamente. Tal divergência, explica-se pelo fato de que a observação da frequência na saída foi feita pelas divisões do osciloscópio virtual do ISIS PROTEUS, o que, naturalmente, gera uma imprecisão. Para traçar uma ideia melhor da aproximação dos dados obtidos com a equação do modelo real (Equação 8), foi feita uma comparação da reta desta equação com reta do Gráfico 1. Esta comparação é representada pelo Gráfico 2.

Gráfico 2 – Comparação entre a simulação e equação do modelo real



Fonte: própria

Pela comparação entre as duas funções, a obtida e a da equação, nota-se uma irrisória diferença. Cujas discrepâncias de valores mais altas são de menos de 5%. Nota-se pequenas perturbações na linearidade da reta do gráfico, que são geradas principalmente pelo fato de que a obtenção da frequência na saída foi feita analisando visualmente as divisões do osciloscópio virtual. As imprecisões da análise visual, juntamente com as imprecisões da medição do osciloscópio contribuem para distorcer o gráfico, contudo, verifica-se uma notável proporcionalidade entre tensão e frequência, que atende com razoável precisão (correlação de 99,99% segundo a função “CORREL” do programa WORD EXCEL 2013 entre os dois conjuntos de dados) a relação estabelecida pela Equação 8.

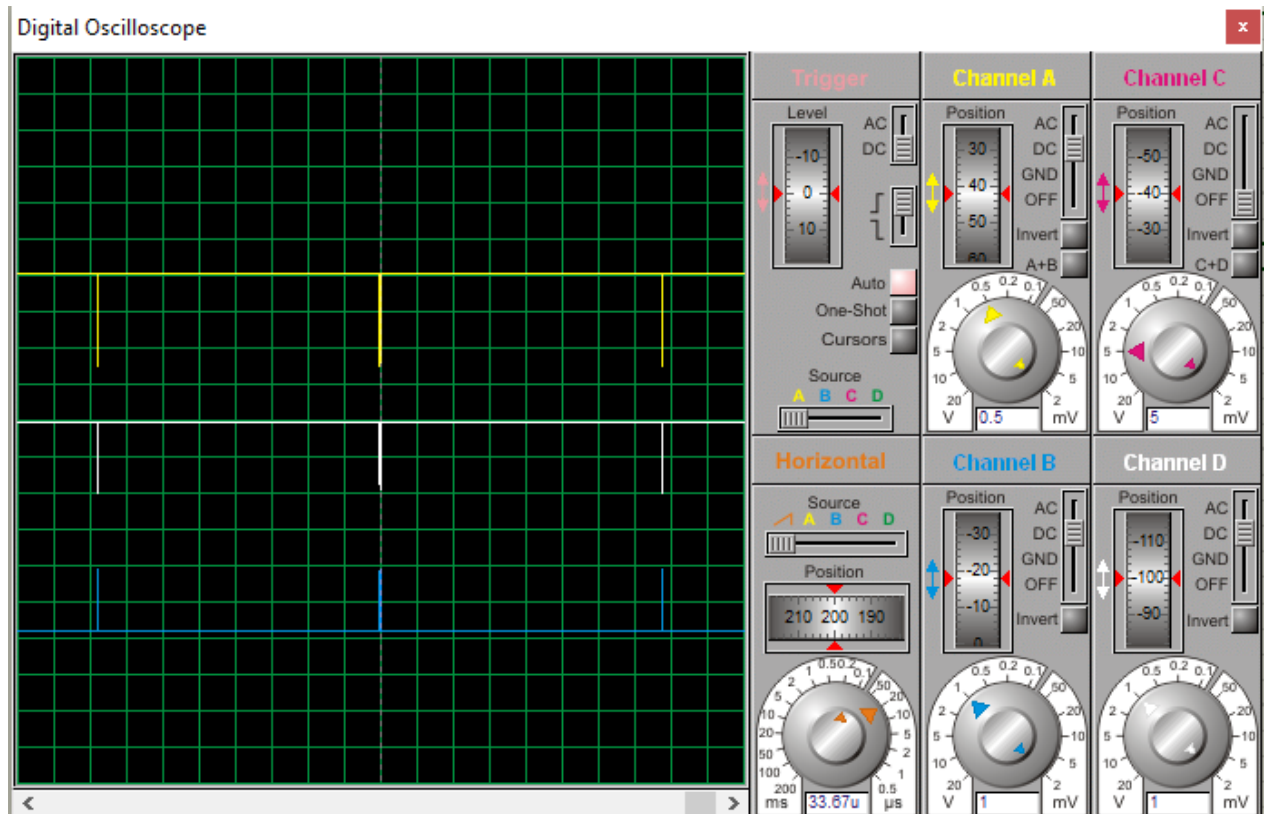
#### 4.4 RESULTADOS DA TRANSMISSÃO PELO RS-485

A transmissão pelo RS-485 tem por objetivo transmitir o sinal de forma a evitar ruídos e degradação no decorrer da transmissão até o CLP, atuando como um repetidor. Esse dispositivo faz a transmissão do sinal de forma espelhada, como mostra a Figura



31. Esse sinal é transmitido diretamente para as portas do CLP.

Figura 31 – Transmissão de pulsos pelo RS-485



Fonte: própria

As formas de onda representadas na Figura 31 são descritas abaixo:

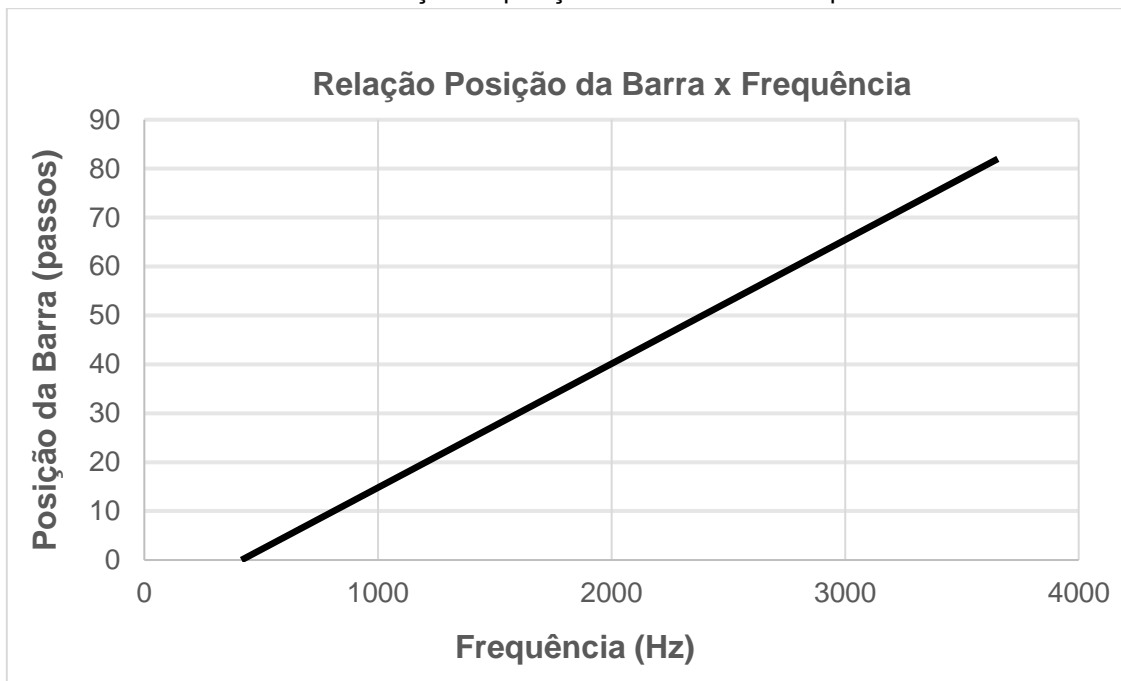
- Canal A, na cor amarela, representa a forma de onda da saída do LM331;
- Canal D, na cor branca, representa a forma de onda da saída não-inversora do RS-485; e
- Canal B, na cor azul, representa a forma de onda da saída inversora do RS-485.

Verifica-se também, a partir da Figura 31, que a frequência do sinal de saída não sofre alterações em relação a frequência do sinal de entrada, o que torna confiável este tipo de operação.

#### 4.5 RELAÇÃO ENTRE POSIÇÃO E A LEITURA DE FREQUÊNCIA

Reiterando o que já foi exposto, a frequência é a grandeza escolhida para indicar a posição da barra de controle e segurança. No Controlador Lógico Programável, esta será lida e transformada para a posição discreta da barra, representada por  $PB$ , que pode variar entre 0 e 82, sendo que a primeira posição  $PB$  representa a tensão de 0.5 V e a última, de 4.5V. Logo, o trabalho do CLP será calcular a função inversa, transformando a frequência para a tensão e, em seguida, em  $PB$  (posição da barra). Assim sendo, usando a Equação 9, a frequência de 416 Hz representa a posição 0, e a frequência 3.654 Hz representa a posição 82. Dividindo essa faixa de  $3654 - 416 = 3238$  Hz por 82 passos, obtêm-se, aproximadamente, 39,5 Hz a cada incremento de posição. Colocando isso em termos de função, gera-se o Gráfico 3.

Gráfico 3 – Relação da posição da barra com a frequência



Fonte: própria

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma técnica digital para indicação de posição das barras de controle do LABGENE. Essa proposta consistiu na sugestão de utilização de componentes para o circuito e a montagem e execução do mesmo no software simulador de circuitos eletrônicos ISIS PROTEUS. Os resultados envolveram a coleta de parâmetros técnicos, não havendo a discussão sobre custos e processos de aquisição. Essa restrição não denota qualquer tipo de falha, mas sim, um comprometimento com os objetivos da pesquisa, que ao decidir não incluir outras linhas além de sua proposta primária, conseguiu alcançar resultados mais significativos no seu campo de atuação.

As etapas que foram consideradas na produção do trabalho foram, portanto, a transformação da posição das barras de controle em um sinal de tensão, a filtragem do ruído dos sinais de tensão, a multiplexação destes sinais em uma única linha de comunicação, a conversão analógica-digital por meio de um conversor de frequência e, por fim, a transmissão pelo protocolo RS-485. Cada uma das etapas foi simulada no *software* ISIS PROTEUS para demonstrar seus resultados, que foram, respectivamente, a representação do sinal de tensão medido juntamente com o ruído inerente, o sucesso que os filtros obtiveram em eliminar o ruído do sinal, a igualdade do tempo de multiplexação dos diversos sinais, a relação proporcional entre a tensão e a frequência convertida e a transmissão do sinal sem degradação significativa. Como produto final, tem-se a função entre a posição da barra e a frequência do sinal, representado a partir da coleta de diversos valores de entrada e saída do circuito de conversão tensão-frequência. Foi provado, portanto, que a frequência do sinal de saída do sistema carrega a informação de posição da barra com um significativo grau de similaridade com o modelo real (correlação de 99,99% com o modelo real pela aplicação da função CORREL do WORD EXCEL 2013). Esta informação será tratada por programa de computador para possibilitar ao operador do sistema o monitoramento das barras de controle em tempo real, pela indicação da posição das barras. Esta etapa, portanto, não é composição dos objetivos e fica como sugestão para futuros trabalhos.

Conclui-se, portanto, com resultados satisfatórios acerca da proposta, cuja inovação esteve mais presente na utilização da frequência como armazenador da informação da posição das barras. Em relação à contribuição para o desenvolvimento do

indicador de posição das barras de controle do reator do LABGENE, ressalta-se o conhecimento produzido pela predição do funcionamento da implementação técnica, contribuindo para o acervo de possibilidades a serem implementadas, estudadas, analisadas e melhoradas, agregando conhecimento de instrumentação e controle nuclear, o que, provavelmente influenciará futuros trabalhos nesse sentido.

Como sugestão para futuros trabalhos, destaca-se a implementação de um programa que analise a informação de frequência obtida pela posição da barra e apresente de forma gráfica, ou por meio de um mostrador digital para o operador do sistema. Outra possibilidade interessante, seria a simulação desta técnica digital por meio de sinais variáveis, que representariam a operação das barras, havendo também simulação de acidentes como ejeção ou queda de barras. Por fim, e não menos importante, apresenta-se outras sugestões, tais como a análise do controle de potência do reator pela aplicação desta técnica e a expansão desta metodologia pela adoção de outras linhas de pesquisa, como processo de aquisição de componentes e custos associados.

## REFERÊNCIAS

- [1] SANTOS, Felipe da Cruz. **Segurança de Instalações Nucleares**, Notas de Aula da Disciplina de Segurança Nuclear, Centro de Instrução Almirante Wandenkolk – CIAW, Rio de Janeiro – RJ, 2017.
- [2] IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES. Vienna: Implementing Digital Instrumentation and Control Systems in the Modernization of Nuclear Power Plants, 2009.
- [3] NATIONAL ACADEMY PRESS. **Digital Instrumentation and Control Systems in Nuclear Power Plants: Safety and Reliability Issues**. Whashington, 1997.
- [4] IAEA TECHNICAL REPORTS SERIES. Vienna: Modern Instrumentation and Control for Nuclear Power Plants: A Guidebook, 2009.
- [5] SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA. A Física Nuclear Hoje. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/~renafna/>>. Acesso em: 29. nov. 2017.
- [6] LAMARSH, Jonh R; BARATTA, Anthony J. **Introduction to Nuclear Engineering**. Nova Jersey: Prentice Hall, 2001, v.3.
- [7] TAUHATA, Luiz. et al. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014, v.10.
- [8] PERROTA, José Augusto. **Curso de Introdução à Engenharia do Núcleo de Reatores**. 1999. p.73.
- [9] TERREMOTO, Luís Antônio Albiac. **Fundamentos de Tecnologia Nuclear de Reatores**. 2004. p.120.
- [10] BITELLI, Ulysses d’Ultra; KURAMOTO, Renato. IPN0025 – Física de Reatores: Experimentos no Reator Nuclear IPEN/MB-01. Slides do Powerpoint.
- [11] NUCLEAR POWER. Rankine Cycle – Steam Turbine Cycle. Disponível em: <<http://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/rankine-cycle-steam-turbine-cycle/>>. Acesso em: 08. jan. 2018.
- [12] ESTADOS UNIDOS. United States Nuclear Regulatory Commission. **Westinghouse Technology Systems Manual**. 209 rev. Pittsburgh.

[13] GUNTHER, W.;SULLIVAN, K. **Aging Assesment of the Westinghouse PWR Control Rod Drive System**. Nova Iorque: Brookhaven National Laboratory Upton, 1991. v. 1.

[14] WESTINGHOUSE ELETRIC COMPANY. **Rod Position Indication System**. Pittsburgh: [2004]. 2 p. Apresenta informações sobre o sistema de de indicação de posição de barras de controle.

[15] PICKHARD, Mark. Top Five Advantages of Reed Switch Technology for Low-Power Metering Applications. **Sensors Online**, Nov. 21, 2014. Disponível em: <<https://www.sensormag.com/components/top-five-advantages-reed-switch-technology-for-low-power-metering-applications>> Acesso em: 24 dez. 2017.

[16] YU, Je-Yong, et. al. Sensory Systems for a Control Rod Position using Reed Switches for the Integral Reactor. *In*: 13th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems, 2007, Istambul.

[17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety Standards No. NS-R-1. **Safety of Nuclear Power Plants: Design**. Vienna, 2000. 73 p.

[18] FRANCO, Sérgio. **Design with operational amplifiers and analog integrated circuits**. 3.ed. New York: Ed. McGraw-Hill, 2002. 658p.

[19] CAPUANO, Francisco G.; IDOETA, Ivan Valeije. **Elementos de Eletrônica Digital**. 40ª ed. São Paulo: Érica, 2011. 544 p.

[20] PERTENCE JÚNIOR, Antonio. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 6.ed. Porto Alegre: Ed. Artmed, 2003. 304p.

[21] BILL, Travis. DPP adds versatility to VFC. **Design Ideas**, p. 99, nov 2002.

[22] INTERSIL AMERICAS LLC. **RS-485 Transceiver Tutorial**. [2015]. Apresenta informações sobre o circuito integrado RS-485.

[23] DUMMER, Geoffrey W. A.; GRIFFIN, Norman B. **Environmental Testing Techniques for Eletronics and Materials**. Oxford: Pergamont Press, 1962. 443 p.

[24] PÓVOA, Alexandre F. Descrição do Protótipo do IPMAB. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por. <[caiomamasamune@gmail.com](mailto:caiomamasamune@gmail.com)> em 23 nov. 2017.

[25] EXSIS DISTRIBUTION SRL. **Reed Switches Technology**. Via Trieste. 4 p. Apresenta informações sobre tecnologia de chaves magnéticas.

[26] HSIENSING HERMETIC SWITCH INC. **Reed Switches Application Notes**. Oklahoma: [2013]. 25p. Apresenta informações relevantes sobre funcionamento, performance e testes de chaves magnéticas em diversos circuitos elétricos.

[27] ABE, Alfredo Yuuitiro. **Instrumentação dos detectores de fluxo de nêutrons**, Notas de Aula da Disciplina de Operação de Reatores, Centro de Instrução Almirante Wandenkolk – CIAW, Rio de Janeiro – RJ, 2017.

[28] INTERSIL CORPORATION. **ISL71831SEH Radiation Hardened 5V 32-Channel Analog Multiplexer**. [2017]. 21p. Apresenta informações sobre o multiplexador ISL71831SEH fabricado pela Intersil Corporation.

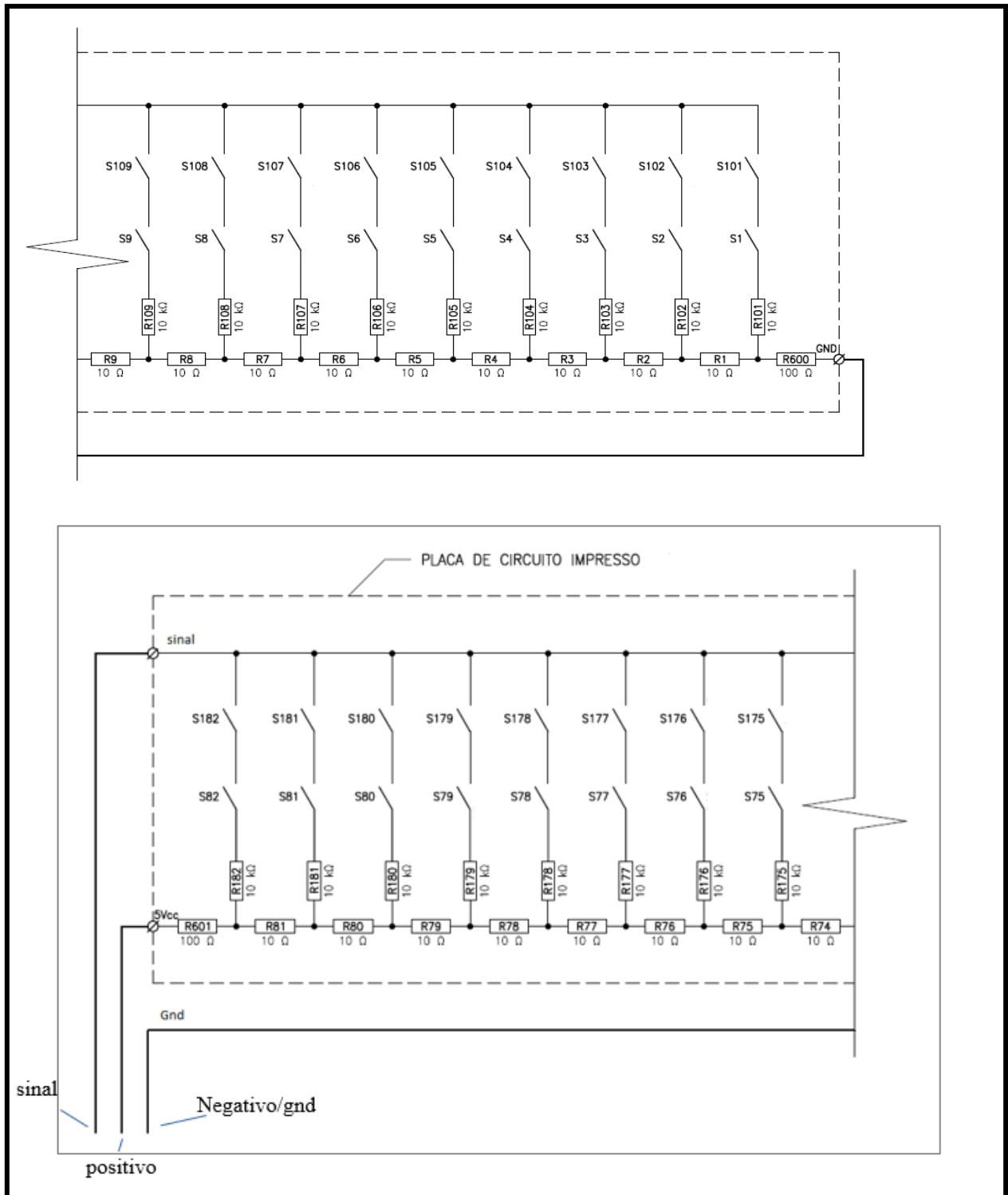
[29] NATIONAL SEMICONDUCTOR. **LM131A/LM131, LM231A/LM231, LM331A/LM331 Precision Voltage-to-Frequency Converters**. [1994]: Arlinton. 16p. Apresenta informações sobre o circuito integrado LM331 fabricado pela National Semiconductor.

[30] TEXAS INSTRUMENT. **DS16F95QML EIA-485/EIA-422A Differential Bus Transceiver**. [2013]. 19p. Apresenta informações sobre o circuito integrado RS-485 fabricado pela Texas Instrument.

[31] STMICROELETRONICS. **Rad-hard 8 binary counter register with 3 state output**. [2004]. 21p. Apresenta informações sobre o contador M54HC590 fabricado pela STMicroelectronics.

## ANEXOS

## ANEXO A – Diagrama elétrico do circuito impresso do IPMAB



Fonte: [26].

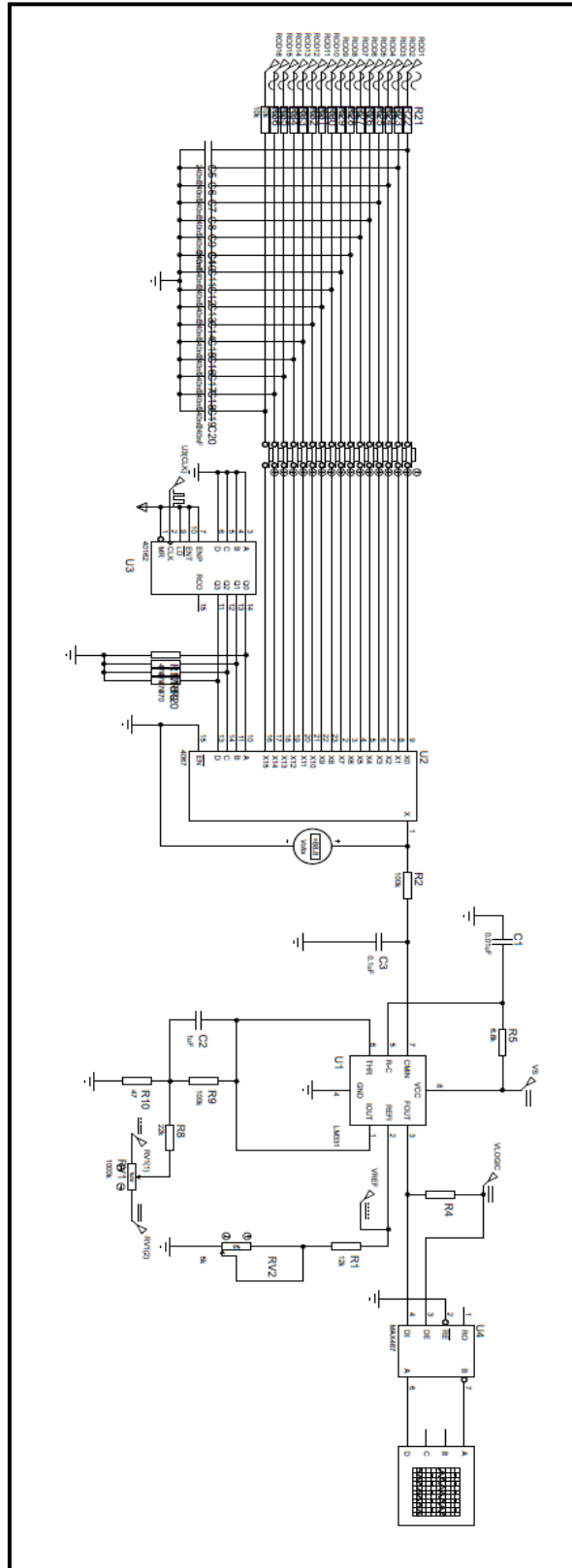


## ANEXO B – Dados técnicos do LM331 fabricado pela National Semiconductor

Absolute Maximum Ratings		Operating Ratings (Note 2)			
(Notes 1, 2)		Operating Ambient Temperature			
If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.		LM231, LM231A	-25°C to +85°C		
		LM331, LM331A	0°C to +70°C		
		Supply Voltage, $V_S$	+4V to +40V		
Supply Voltage, $V_S$	40V				
Output Short Circuit to Ground	Continuous				
Output Short Circuit to $V_{CC}$	Continuous				
Input Voltage	-0.2V to + $V_S$				
Package Dissipation at 25°C	1.25W (Note 3)				
Lead Temperature (Soldering, 10 sec.)					
Dual-In-Line Package (Plastic)	260°C				
ESD Susceptibility (Note 5)	500V				
Electrical Characteristics		Package Thermal Resistance			
All specifications apply in the circuit of Figure 4, with $4.0V \leq V_S \leq 40V$ , $T_A = -25^\circ C$ , unless otherwise specified.		Package	$\theta_{JA}$		
		8-Lead Plastic DIP	100°C/W		
Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
VFC Non-Linearity (Note 4)	$4.5V \leq V_S \leq 20V$		$\pm 0.003$	$\pm 0.01$	% Full-Scale
	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$		$\pm 0.006$	$\pm 0.02$	% Full-Scale
VFC Non-Linearity in Circuit of Figure 3	$V_S = 15V$ , $f = 10$ Hz to 11 kHz		$\pm 0.024$	$\pm 0.14$	% Full-Scale
Conversion Accuracy Scale Factor (Gain)	$V_{IN} = -10V$ , $R_S = 14$ k $\Omega$		1.00	1.05	kHz/V
			0.95	1.10	kHz/V
Temperature Stability of Gain	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ , $4.5V \leq V_S \leq 20V$		$\pm 30$	$\pm 150$	ppm/°C
			$\pm 20$	$\pm 50$	ppm/°C
Change of Gain with $V_S$	$4.5V \leq V_S \leq 10V$		0.01	0.1	%/V
	$10V \leq V_S \leq 40V$		0.006	0.06	%/V
Rated Full-Scale Frequency	$V_{IN} = -10V$	10.0			kHz
Gain Stability vs. Time (1000 Hours)	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$		$\pm 0.02$		% Full-Scale
Over Range (Beyond Full-Scale) Frequency	$V_{IN} = -11V$	10			%
INPUT COMPARATOR					
Offset Voltage	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$		$\pm 3$	$\pm 10$	mV
			$\pm 4$	$\pm 14$	mV
			$\pm 3$	$\pm 10$	mV
Bias Current		-80	-300	nA	
Offset Current		$\pm 8$	$\pm 100$	nA	
Common-Mode Range	$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$	-0.2		$V_{CC} - 2.0$	V
TIMER					
Timer Threshold Voltage, Pin 5		0.63	0.667	0.70	$\times V_S$
Input Bias Current, Pin 5	$V_S = 15V$ $0V \leq V_{PIN 5} \leq 0.9V$	All Devices	$\pm 10$	$\pm 100$	nA
		LM231/LM331	200	1000	nA
		LM231A/LM331A	200	500	nA
$V_{SAT PIN 5}$ (Reset)	$I = 5$ mA		0.22	0.5	V
CURRENT SOURCE (Pin 1)					
Output Current	$R_S = 14$ k $\Omega$ , $V_{PIN 1} = 0$		126	135	$\mu A$
			116	136	$\mu A$
Change with Voltage	$0V \leq V_{PIN 1} \leq 10V$		0.2	1.0	$\mu A$
Current Source OFF Leakage					

Fonte: [33].

### ANEXO C – Esquemático da simulação do circuito



Fonte: Própria

**ANEXO D – Dados de entrada de tensão e saída em frequência da simulação do LM331 (conversor V/F)**

<b>Tensão (V)</b>	<b>Tempo (us)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
0,06	18400,00	54,35
0,12	9100,00	109,89
0,18	6200,00	161,29
0,24	4520,00	221,24
0,3	3840,00	260,42
0,36	3000,00	333,33
0,42	2560,00	390,63
0,48	2260,00	442,48
0,54	2080,00	480,77
0,6	1880,00	531,91
0,66	1720,00	581,40
0,72	1567,00	638,16
0,78	1472,00	679,35
0,84	1367,00	731,53
0,9	1293,00	773,40
0,96	1227,00	815,00
1,02	1146,00	872,60
1,08	1100,00	909,09
1,14	1053,00	949,67
1,2	1000,00	1000,00
1,26	946,00	1057,08
1,32	913,00	1095,29
1,38	867,00	1153,40
1,44	840,00	1190,48
1,5	812,00	1231,53
1,56	778,00	1285,35
1,62	750,00	1333,33
1,68	728,00	1373,63
1,74	696,00	1436,78
1,8	672,00	1488,10
1,86	660,00	1515,15
1,92	640,00	1562,50
1,98	619,00	1615,51
2,04	597,00	1675,04
2,1	576,00	1736,11
2,16	560,00	1785,71

2,22	547,00	1828,15
2,28	536,00	1865,67
2,34	522,00	1915,71
2,4	509,00	1964,64
2,46	499,00	2004,01
2,52	490,00	2040,82
2,58	479,00	2087,68
2,64	467,00	2141,33
2,7	456,00	2192,98
2,76	448,00	2232,14
2,82	437,00	2288,33
2,88	427,00	2341,92
2,94	419,00	2386,63
3	410,00	2439,02
3,06	402,00	2487,56
3,12	395,00	2531,65
3,18	389,00	2570,69
3,24	381,00	2624,67
3,3	373,00	2680,97
3,36	366,00	2732,24
3,42	359,00	2785,52
3,48	352,00	2840,91
3,54	346,00	2890,17
3,6	341,00	2932,55
3,66	336,00	2976,19
3,72	331,00	3021,15
3,78	326,00	3067,48
3,84	321,00	3115,26
3,9	316,00	3164,56
3,96	312,00	3205,13
4,02	307,00	3257,33
4,08	303,00	3300,33
4,14	298,00	3355,70
4,2	294,00	3401,36
4,26	290,00	3448,28
4,32	286,00	3496,50
4,38	282,00	3546,10
4,44	278,00	3597,12
4,5	274,00	3649,64
4,56	271,00	3690,04
4,62	268,00	3731,34

<b>4,68</b>	265,00	3773,58
<b>4,74</b>	261,00	3831,42
<b>4,8</b>	258,00	3875,97
<b>4,86</b>	255,00	3921,57
<b>4,92</b>	252,00	3968,25
<b>5</b>	249,00	4016,06

Fonte: própria