

INSTITUTO FEDERAL DO PARANÁ
CURSO TÉCNICO EM ELETRÔNICA

MEDIDOR DE UMIDADE SEM CONTATO

GABRIEL ROCHA ROGOGINSKI
JULIANA BEATRIZ VITÓRIA D'AGOSTIN DE AZEVEDO SANT'ANA
NYCOLLAS DANIEL OLIVEIRA SANTOS

Relatório apresentado como requisito parcial para
a aprovação na disciplina de Automação Industrial
do curso Técnico Integrado de Eletrônica do
Instituto Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Wilerson Sturm

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Araújo

CURITIBA

2023

Dedicamos este projeto de conclusão de Automação Industrial ao lecionador da matéria propriamente, Wilerson Sturm

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao professor Luiz Carlos Felizari ao dar a ideia do capacitor interdigital, ao professor Perci Ayres Antiqueira por ajudar a arrumar alguns erros no código VHDL e ao aluno Gabriel Czernysz Ribas por dar a ideia do uso dos amplificadores operacionais como comparador para podermos usar a onda senoidal no RC ao invés de uma onda quadrada, o que poderia acarretar até em problemas de leitura pela FPGA.

RESUMO

Este relatório refere-se ao projeto disciplinar proposto para a disciplina de Automação industrial, lecionada pelo professor Wilerson Sturm, de modo a colocar em prática todo o conhecimento teórico obtido durante o ano letivo. Buscando flexibilizar a medição de umidade, este projeto busca desenvolver o mercado de pesquisa e indústria madeireira ao implementar técnica de medição de defasagem em uma *FPGA* (*Field-Programmable Gate Array*). Em conjunto com um capacitor interdigital em um circuito RC (Resistor-capacitor), o dispositivo produz uma onda senoidal que é defasada, logo convertida para ondas quadradas, pelo comparador e após isso é feita a medição da defasagem pela *FPGA para* determinar a umidade da madeira. A integração da *FPGA* busca variar os métodos de medição da madeira e mantendo eficiência e precisão nas medições de umidade, não danificando a madeira, proporcionando uma medição de umidade rápida, exata e não invasiva, adequada para aplicações industriais e de pesquisa.

Palavras-chave: Umidade; indústria; pesquisa; *FPGA*; flexibilidade; medição.

ABSTRACT

This report refers to the disciplinary project proposed for the subject of Industrial Automation, taught by Professor Wilerson Sturm, in order to put into practice all the theoretical knowledge obtained during the school year. Seeking to make humidity measurement more flexible, this project aims to develop the research market and the timber industry by implementing a delay measurement technique in an FPGA (Field-Programmable Gate Array). In conjunction with an interdigital capacitor in an RC (Resistor-capacitor) circuit, the device produces a sine wave that is delayed when it pass thru the RC circuit, then it's converted to square waves by the comparator, after which the delay is measured by the FPGA to determine the humidity of the wood. The integration of the FPGA seeks to vary the methods of measuring moisture of wood and maintaining efficiency and precision in moisture measurements, without damaging the wood, providing a fast, accurate and non-invasive humidity measurement, suitable for industrial and research applications.

Keywords: humidity; industry; research; FPGA; flexibility; measurement.

LISTA DE SIGLAS

| | |
|------|--------------------------------------|
| FPGA | <i>Field-Programmable Gate Array</i> |
| RC | Resistor-capacitor |
| CI | Circuito Integrado |
| VCO | <i>Voltage-controlled oscillator</i> |
| VCC | Tensão da fonte |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 08 |
| 2. OBJETIVO..... | 09 |
| 3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... | 10 |
| I. DISPOSITIVO EXTERNO..... | 10 |
| II. DISPOSITIVO INTERNO..... | 12 |
| III. EQUAÇÕES..... | 15 |
| IV. ORÇAMENTO..... | 16 |
| 4. CONSIDERAÇÕES..... | 18 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 19 |
| 6. REFERÊNCIAS..... | 20 |

1.INTRODUÇÃO

O sensor de umidade de madeira sem contato representa um projeto relevante para ampliar o mercado madeireiro, oferecendo uma solução tecnológica e avançada para um dos desafios do setor: a medição precisa da umidade da madeira. Destacando-se por uma abordagem diferente, o emprego de uma *FPGA* para processar e determinar a umidade da madeira de forma rápida e precisa, sem causar dano ao material. Esta abordagem não apenas melhora a eficiência na medição da umidade, mas também abre novas possibilidades para o setor madeireiro. Ao adotar esta tecnologia, a indústria pode superar algumas das limitações dos métodos tradicionais, que muitas vezes são invasivos e menos precisos. Além disso, a natureza não invasiva do sensor torna-o ideal para uma ampla gama de aplicações, desde o controle de qualidade na produção até pesquisas avançadas em manejo de florestas. A indústria madeireira é um setor crucial da economia global, que desempenha um papel vital em várias áreas, desde a construção civil até a produção de papel e mobiliários. Caracterizada por suas práticas tradicionais, esta indústria depende fortemente de recursos naturais e enfrenta desafios constantes relacionados à sustentabilidade e ao manejo responsável das florestas. Com a crescente preocupação ambiental, a indústria está sob pressão para adotar práticas mais sustentáveis e eficientes. Tendo isso em vista, a tecnologia tem um papel fundamental neste processo, oferecendo soluções para aumentar a eficiência, reduzir o desperdício e melhorar a gestão dos recursos.

A integração de um *FPGA* no sensor de umidade de madeira sem contato tem propósitos como: oferecer uma flexibilidade significativa em termos de programação e reconfiguração, o que permite adaptar o dispositivo para diferentes tipos de madeira e condições de umidade. A partir disso, o dispositivo pode processar dados em alta velocidade, garantindo que as medições da umidade sejam realizadas de forma rápida e eficiente, o que é essencial para aplicações nas indústrias, que exigem rapidez e precisão. Outro propósito seria a precisão aprimorada, já que a *FPGA* pode ser programada para realizar algoritmos complexos e precisos de processamento de sinal, melhorando a acurácia das medições de umidade. Tendo isso em vista, podemos concluir que a versatilidade e a precisão aprimorada da *FPGA* garantem que o sensor possa ser adaptado para avanços futuros em tecnologias de medição e processamento de dados.

2.OBJETIVOS

Esta implementação tem objetivo de dar uma possibilidade abrir o mercado a novas tecnologias no setor de processamento de madeira. Não buscando melhorar os métodos existentes, mas estabelecendo um precedente para a aceitação e integração em possíveis inovações futuras. Este sensor busca conduzir outros desenvolvedores e empresas a explorar e introduzir novas soluções tecnológicas, potencialmente transformando práticas padrão na indústria e na pesquisa. Este movimento em direção a tecnologias mais avançadas e eficientes pode catalisar uma onda de modernização no setor, estimulando a competitividade, a eficiência e a sustentabilidade. Este projeto desenvolve a funcionalidade de um sensor de madeira sem contato, baseado na técnica de medição de defasagem em uma *FPGA*, utilizando um capacitor interdigital em um circuito RC. O dispositivo emprega dois amplificadores operacionais para converter as leituras de defasagem em ondas quadradas. Estas ondas são posteriormente processadas por uma *FPGA*, que realiza análises precisas para determinar a umidade da madeira, expressa em porcentagem. A integração da *FPGA* busca variar os métodos de medição da madeira e mantendo eficiência e precisão nas medições de umidade, não danificando a madeira, proporciona uma medição de umidade rápida, exata e não invasiva, adequada para aplicações industriais e de pesquisa.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este projeto se compõe em duas partes: externa, onde tem-se o circuito RC com medição por defasagem e a interna, onde se tem a lógica que transforma o valor da medição defasada em valores legíveis através de diversos cálculos. Abaixo há um diagrama esquemático ilustrando a ideia da lógica do circuito (Figura 1).

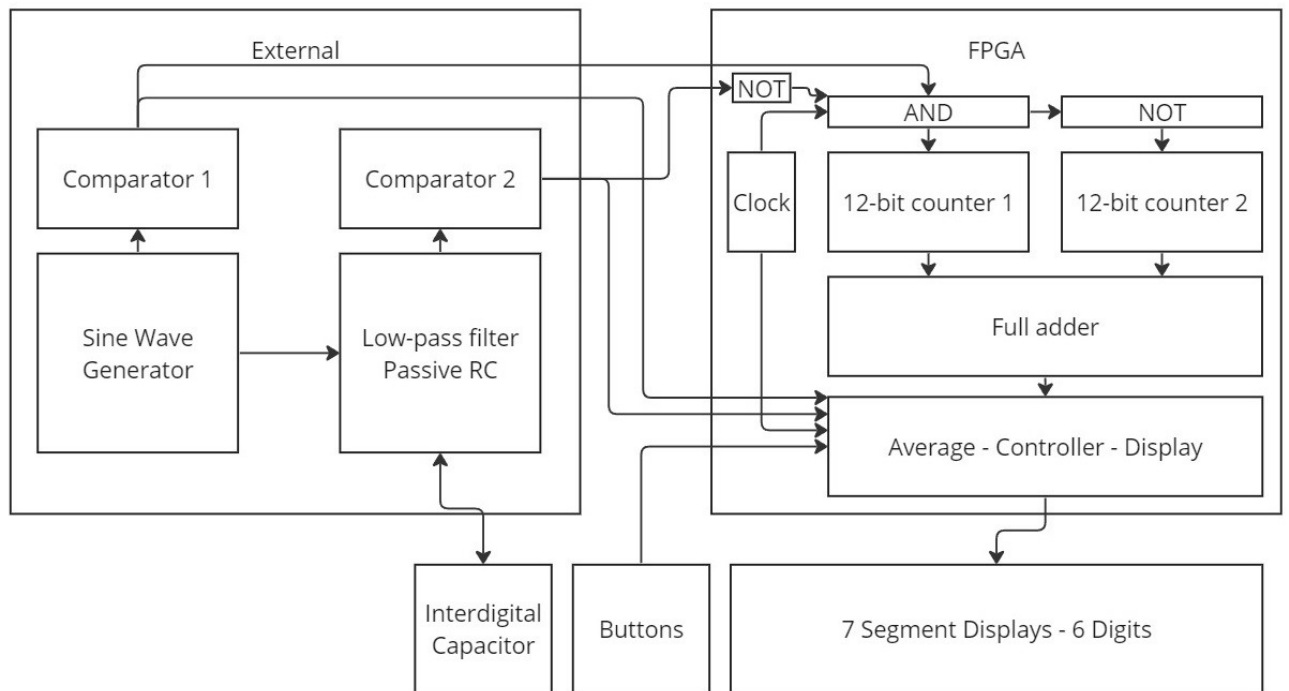


Figura 1: Diagrama esquemático do projeto feito pelos alunos.

I. DISPOSITIVO EXTERNO

O dispositivo externo consiste em um *CI* VCO que gera uma onda senoidal que segue à entrada não inversora de um amplificador operacional, qual funciona como comparador, tendo sua tensão de referência na entrada inversora " $V_{CC}/2$ ". Sendo assim, terá em sua saída uma onda quadrada diretamente ligada a onda senoidal. Além disso, a saída do VCO retorna na entrada do circuito RC, onde o capacitor é o interdigital. Assim a diferença de fase que a onda irá sofrer em relação a entrada depende diretamente da capacitância.

A saída do circuito RC é ligada em outro operacional com a mesma configuração do primeiro exceto pela entrada não inversora a qual recebe agora a saída do circuito RC e não mais a entrada. A saída dos dois operacionais é ligada a um circuito que funciona como uma porta inversora (comportamento que não influencia na medição da defasagem), esse circuito com apenas um transistor e dois resistores tem como objetivo diminuir a tensão para o sinal para a entrada no *FPGA*.

A escolha de gerar uma onda senoidal ao invés de uma onda quadrada foi pela quantidade de harmônicas que influenciariam no circuito RC, como uma onda quadrada teoricamente é formada de infinitas harmônicas, poderia afetar a defasagem gerada.

O resistor do circuito RC deve ser calculado para se obter a frequência de corte o mais próximo possível da frequência gerada pelo VCO, nessa área a mudança de fase é maior e mais linear do que em outras frequências que não sejam a de corte, o cálculo em questão será colocado na seção III do atual capítulo.

Abaixo se encontra o diagrama da parte externa do dispositivo (Figura 2).

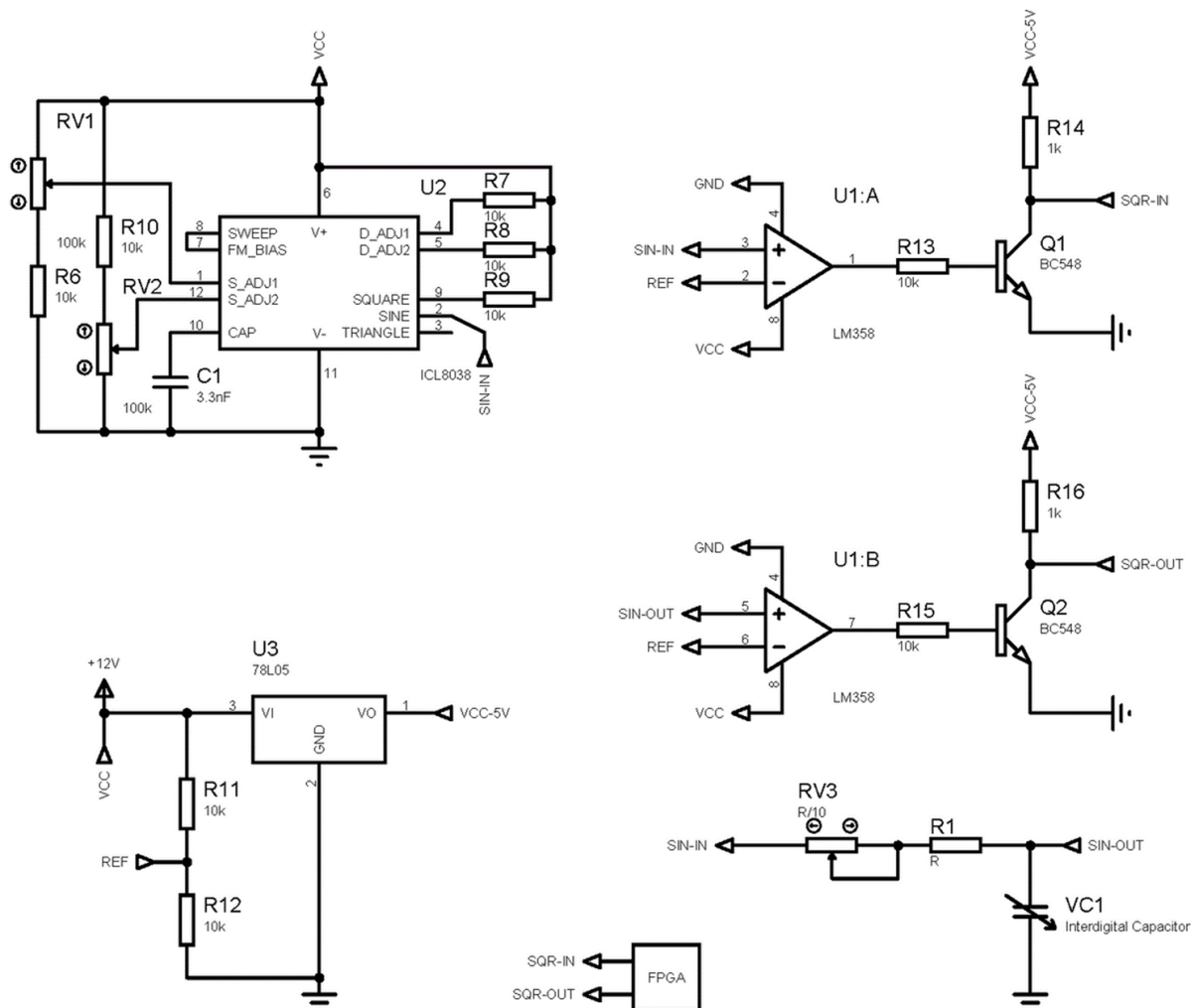


Figura 2: Diagrama do circuito RC com saídas em dois comparadores, um defasado e outro comum, feito pelos alunos.

II. DISPOSITIVO INTERNO

O dispositivo interno se trata da *FPGA* com o projeto sintetizado dentro dela, o projeto interno foi separado em vários blocos diferentes, sendo eles os blocos de contagem (*clk_multiplier*) que incrementam a contagem tanto em borda de descida quanto em borda de subida do *clock* enquanto a *sqr_in*=1, *sqr_out*=0 e *trg*=1.

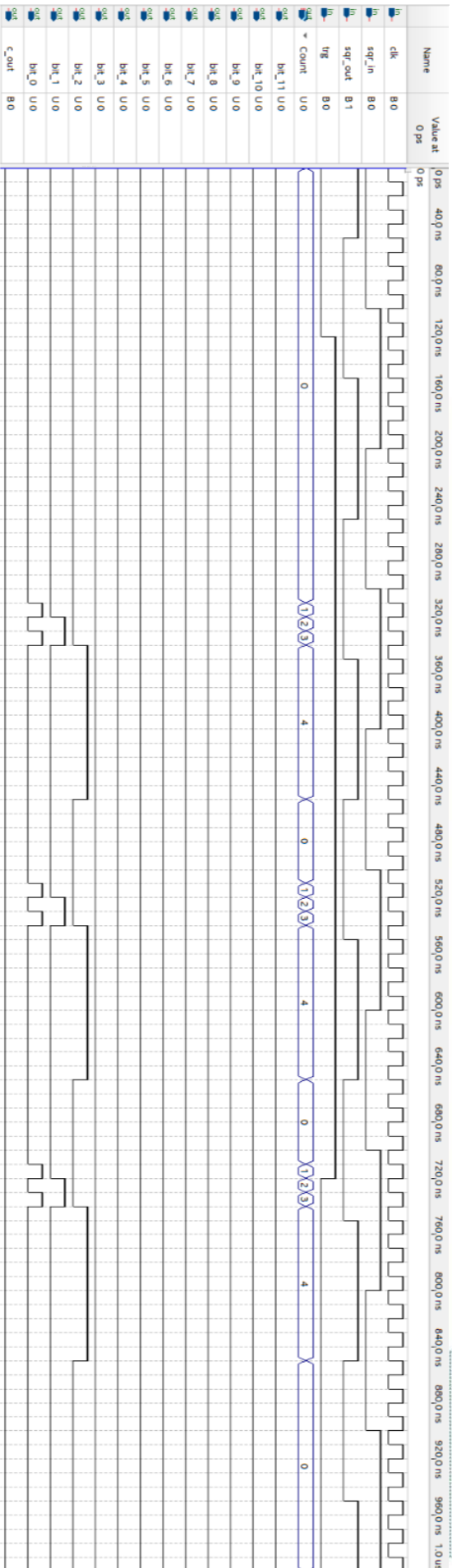


Figura 3: Circuito com os *clock multipliers* e sua forma de onda.

Os outros blocos são o que faz todos os cálculos necessários (*average*), o bloco que possui uma máquina de estados que armazena qual operação está sendo realizada e recebe os parâmetros que podem ser alterados pelos botões e são diferentes para cada estado (*controller*) e por fim o bloco que permite que todas essas informações sejam mostradas no display de 7 segmentos (*display*).

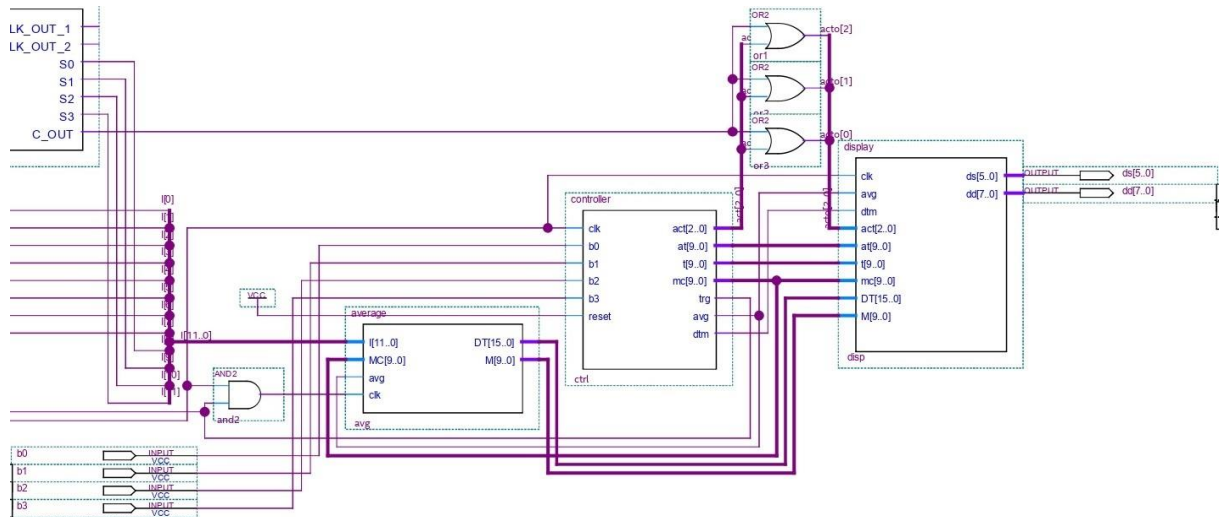


Figura 4: Circuito de controle, aquisição e amostra de dados.

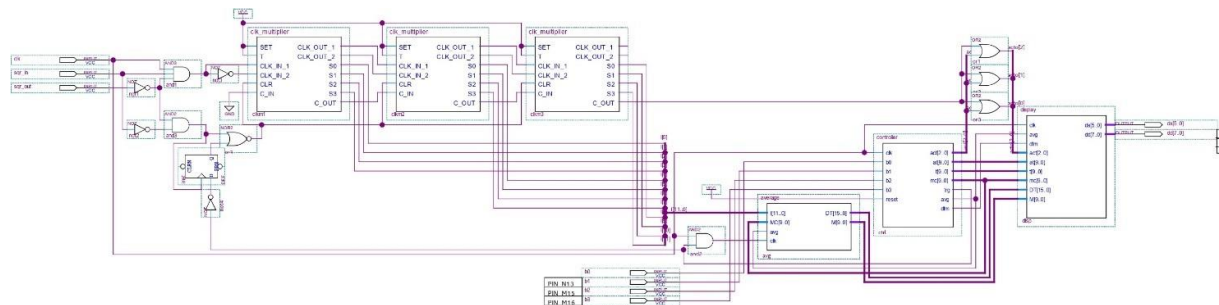


Figura 5: Diagrama macroscópico do circuito interno.

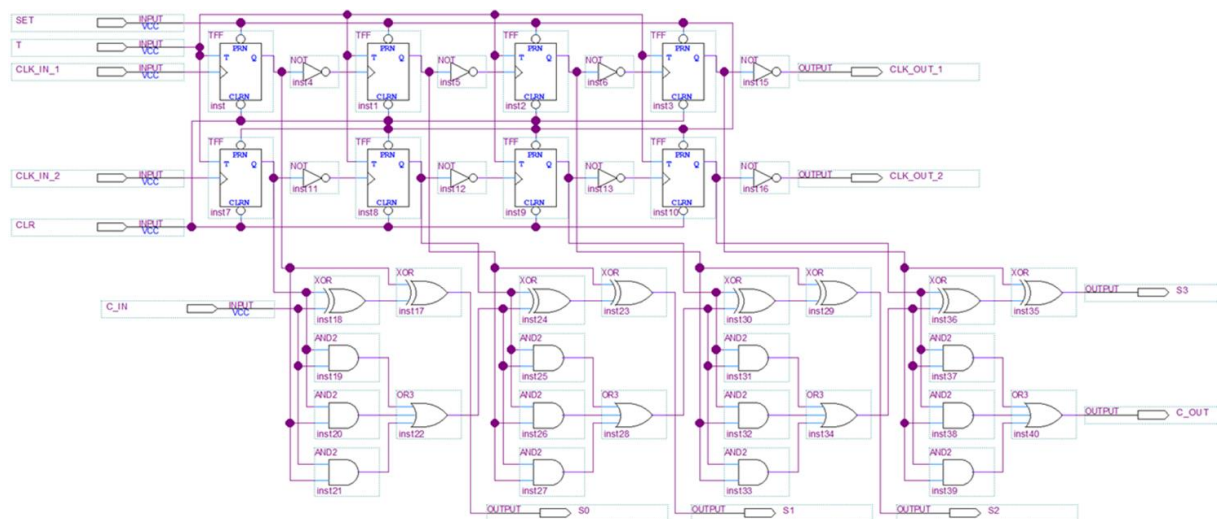


Figura 6: Diagrama microscópico do circuito do *clk_multiplier*.

III. EQUAÇÕES

$$f_{icl}=0.33/RC_1$$

$$R=R_7=R_8$$

$$f_c=1/(2\pi R_1VC_1)$$

$$f_c \approx f_{icl} \text{ (Com o dieletrico do interdigital capacitor sendo o ar)}$$

$$REF=VCC/2$$

$$F_{clk}=\text{Frequência do clock}$$

$$N=\text{Número de saída do full adder}$$

$$\Delta t[s]=N*1/(F_{clk}*2)$$

$$\text{Erro de } \Delta t[s]=\pm 1/(F_{clk}*2)$$

IV. ORÇAMENTO

Ao longo do processo de desenvolvimento do projeto, foram necessários diversos componentes, quais foram classificados abaixo:

| Item | Loja | Descrição do produto | Quantidade | Preço unitário | Preço total |
|------|------------------------------|---|--------------------------|----------------|-------------|
| 1 | RL - Componentes eletrônicos | Resistores 10K Ω ($\frac{1}{4}$ W e tolerância: 5%) | Conjunto com 10 unidades | R\$0,07 | R\$0,70 |
| 2 | RL - Componentes eletrônicos | Capacitor cerâmico 15nF (Tensão: 50V e Tolerância: 10 %) | 1 unidade | R\$0,20 | R\$0,20 |
| 3 | RL - Componentes eletrônicos | Capacitor cerâmico 100nF (Tensão: 50V e Tolerância: 10 %) | 1 unidade | R\$0,45 | R\$0,45 |
| 4 | RL - Componentes eletrônicos | Placa fenolite 20x20 | 1 unidade | R\$21,70 | R\$21,70 |
| 5 | Baú da eletrônica | Oscilador ICL8038 (VCO) | 1 unidade | R\$5,00 | R\$5,00 |
| 6 | RL - Componentes eletrônicos | Amplificador operacional LM358 (Dual) | 1 unidade | R\$1,50 | R\$1,50 |
| 7 | RL - Componentes eletrônicos | Transistor BC548 BJT | 2 unidades | R\$0,25 | R\$0,50 |
| 8 | Baú da eletrônica | Regulador de tensão 78L05 (5V) | 1 unidade | R\$1,84 | R\$1,84 |
| 9 | AliExpress | FPGA Altera DE2-115 | 1 unidade | R\$6.838,30 | R\$6.838,30 |
| 10 | Mercado Livre | Fonte Fa-3003 Instrutherm | 1 unidade | R\$762,63 | R\$762,63 |

| | | | | | |
|----|------------------------------|---|--------------------------|-----------|-----------------------|
| 11 | Mercado Livre | Osciloscópio Dso2512g, 120Mhz, 2 canais + Gerador de função | 1 unidade | R\$862,92 | R\$862,92 |
| 12 | RL - Componentes eletrônicos | Jumpers macho-macho | Conjunto com 20 unidades | R\$00,60 | R\$12,00 |
| - | - | - | - | - | Total: R\$8.507,74 |

Tabela 1 - Especificações, quantidades de componentes e orçamento do projeto feita pelos alunos.

4.CONSIDERAÇÕES

O projeto teve problemas na parte do código que faz jus ao “*controller*”, que tem a função de fazer a verificação dos processos realizados por todas as partes do dispositivo e compilá-lo em um resultado visível, junto da limitação que houve ao fazer testes no *FPGA*, além do atraso em buscar ajuda de um professor atestado na área de programação em *VHDL*, não foi possível resolver em tempo hábil este problema.

Também houve problema no capacitor interdigital tendo relutância em reconhecer qualquer elemento aplicado em cima do mesmo, sendo necessário refazer o capacitor, mas em razão da demora para inicialização dos testes práticos não foi possível fabricar um novo.

5.CONCLUSÃO

Não obtivemos sucesso pleno nos testes realizados, porém foi averiguado que é possível fazer com que o circuito funcione de forma correta, obtivemos um resultado satisfatório no circuito externo e no circuito da *FPGA* em algumas partes obtivemos resultados que cumpriram com as expectativas e outras que não chegaram a cumprir as expectativas por falta de tempo, o qual seria necessário para realização de mais testes e após uma análise para esses problemas serem resolvidos.

6.REFÊRENCIAS

INSTITUTO FEDERAL DO PARANÁ. **Manual de normas para apresentação de trabalhos acadêmicos do Instituto Federal do Paraná: padrão ABNT** / organização Evandra Campos Castro...[et. al.]. - Curitiba, 2023.