

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO SILVEIRA QUINTÃO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

INDUTÍMETRO DIGITAL

Porto Alegre
(2011)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

INDUTÍMETRO DIGITAL

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Yeddo Braga Blauth

Porto Alegre
(2011)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LEANDRO SILVEIRA QUINTÃO

INDUTÍMETRO DIGITAL

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Yeddo Braga Blauth, UFRGS.

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC -
Florianópolis, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Gilson Wirth, UFRGS

Doutor pela University of Dortmund – Dortmund, Alemanha.

Prof. Eric Fabris, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS – Porto Alegre,
Brasil.

Porto Alegre, Dezembro de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis. Dedico também à esposa e filhos que compreenderam a ausência durante esse tempo.

AGRADECIMENTOS

Aos pais que sempre me incentivaram a estudar e que realizaram inúmeros esforços para sempre me presentear com educação de qualidade.

Aos colegas pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À empresa que me apoiou desde o começo do curso compreendendo todos os horários alternados desses anos.

À Universidade, professores, funcionários,

À esposa e filhos que compreenderam as ausências e nervosismos destes longos anos.

RESUMO

Este documento foi criado para detalhar a construção de um medidor digital de indutância desde a análise teórica dos circuitos que compõe o projeto, detalhamento da construção prática e especificação das programações envolvidas. Análise dos resultados e comparação com outros equipamentos já existentes no mercado.

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Frequência. Indutância. Eletrônica e Instrumentação.

ABSTRACT

This document was created to detail the construction of a digital meter inductance from the theoretical analysis of the circuits that make up the design, construction detailing and specification practice schedules involved. Analysis of results and comparison with other devices already on the market.

Keywords: Electrical Engineering. Frequency. Inductance. Electronic and Instrumentation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	ANÁLISE DE ALTERNATIVAS.....	13
3	ANÁLISE DO CIRCUITO ADOTADO	17
3.1	Análise Teórica do Circuito LC	20
3.2	Cálculo da Função $V_C(t)$ com $L = 0,1mH$	24
3.2.1	Primeira Interação	24
3.2.2	Segunda Interação	26
3.2.3	Terceira Interação.....	28
3.2.4	Quarta Interação	30
3.2.5	Quinta Interação	32
3.2.6	Sexta Interação	34
3.2.7	Sétima Interação	36
3.2.8	Oitava Interação	38
3.3	Cálculo da Função $V_C(t)$ com $L = 1mH$	40
3.4	Cálculo da Função $V_C(t)$ com $L = 10mH$	41
3.5	Cálculo da Função $V_C(t)$ com $L = 50mH$	42
3.6	Cálculo da Resposta de Frequência do Circuito Oscilador	42
4	PROJETO DA PARTE ANALÓGICA	44
4.1	Fonte de Alimentação.....	45
4.2	Oscilador LC	45
4.3	Buffer.....	46
4.4	Redutor de Tensão.....	46
5	PROJETO DA PARTE DIGITAL.....	48
5.1	Plataforma de Programação e Compilação	49
5.2	Fluxograma de Operação.....	50
5.3	Descrição do Programa	53
6	RESULTADOS ALCANÇADOS	62
6.1	Montagem.....	62
6.2	Testes de Medidas	63
7	CONCLUSÃO	66
8	BIBLIOGRAFIA	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	FAIXA DE INDUTÂNCIA COM RESPECTIVA FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO E RESISTÊNCIA EM SÉRIE.....	16
Tabela 2	COMPARAÇÃO DOS VALORES DE FREQUENCIA.....	43
Tabela 3	VALORES DE K_L	53
Tabela 4	COMPARATIVO DE MEDIÇÕES	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 01	Primeiro Circuito Estudado	13
Figura 02	Gráfico da Corrente I em função do Tempo.....	13
Figura 03	Segundo Circuito Estudado	14
Figura 04	Tensão de Entrada e Tensão no Indutor	15
Figura 05	Circuito Oscilador LC com Schmitt Trigger	17
Figura 06	Curva V_C x V_O	18
Figura 07	Formas de Ondas Características do circuito oscilador LC com Schmitt Trigger	18
Figura 08	Circuito Equivalente Quando V_O está em nível alto	19
Figura 09	Circuito Equivalente Quando V_O está em nível baixo	20
Figura 10	Circuito Equivalente Quando V_O está em nível alto com resistência Interna do Indutor.....	20
Figura 11	Circuito Equivalente Quando V_O está em nível baixo com resistência Interna do Indutor.....	22
Figura 12	Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Primeira Interação.....	25
Figura 13	Corrente do Indutor (I) x Tempo (t) – Primeira Interação.....	26
Figura 14	Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Segunda Interação.....	27
Figura 15	Corrente do Indutor (I) x Tempo (t) – Segunda Interação.....	28
Figura 16	Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Terceira Interação	29
Figura 17	Corrente do Indutor (I) x Tempo (t) – Terceira Interação	30
Figura 18	Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Quarta Interação.....	31
Figura 19	Corrente do Indutor (I) x Tempo (t) – Quarta Interação	32
Figura 20	Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Quinta Interação.....	33
Figura 21	Corrente do Indutor (I) x Tempo (t) – Quinta Interação	34
Figura 22	Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Sexta Interação.....	35
Figura 23	Corrente do Indutor (I) x Tempo (t) – Sexta Interação	36
Figura 24	Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Sétima Interação.....	37
Figura 25	Corrente do Indutor (I) x Tempo (t) – Sétima Interação	38
Figura 26	Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Oitava Interação.....	39
Figura 27	Corrente do Indutor (I) x Tempo (t) – Oitava Interação.....	40
Figura 28	Circuito Analógico.....	44
Figura 29	Fonte de Alimentação	45

Figura 30	Circuito Digital	48
Figura 31	Circuito de Gravação do Microcontrolador	48
Figura 32	Fluxograma de Operação	50
Figura 33	Indutância x Contagem do Timer	52
Figura 34	Display LCD	56
Figura 35	Exemplo de Medição no Display LCD	58
Figura 36	Montagem do Circuito Analógico	62
Figura 37	Montagem do Circuito Digital	63
Figura 38	Indutores de Teste	64
Figura 39	Indutor de Teste	64
Figura 40	Indutor de Teste Variável	65

1 INTRODUÇÃO

Todo aluno, projetista ou técnico que estuda ou trabalha na área de eletrônica irá se deparar em algum instante em sua carreira com circuitos que possuem indutâncias. Sejam circuitos osciladores, sejam fontes chaveadas ou filtros, ou qualquer outro projeto, o indutor é um componente importante e muito utilizado.

Porém é um componente que não possui larga escala de valores comerciais. Muitos projetos de circuitos eletrônicos irão se deparar com a construção de um indutor próprio para aquele projeto. Neste instante irão entrar informações do tipo núcleo, espessura do fio, tamanho e forma da espira, e número de espiras, para encontrar o valor final da indutância.

E como pode ser confirmado se o valor da indutância está certo, se realmente atingiu o valor esperado? Por isso a ideia de um medidor de indutância que poderá verificar os componentes já existentes, confirmar valores de indutores criados, auxiliando o estudante ou técnico em bancada.

2 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS

Para realizar a medida do valor da indutância, é preciso um circuito onde alguma característica varie como função da indutância. No início do trabalho vários circuitos foram estudados. Dois deles são apresentados a seguir.

O primeiro circuito estudado é mostrado na figura 01:

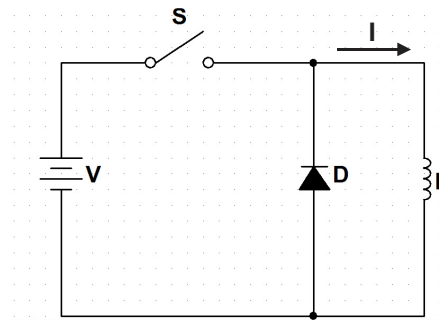


Figura 01: Primeiro circuito estudado

No circuito da figura 01, V é uma tensão CC e S é um transistor, operando como chave, ou seja, abrindo e fechando com uma determinada frequência. Quando S fecha, a corrente I aumenta linearmente. Quando S abre, o indutor se descarrega pelo diodo e I diminui. A função da corrente I em relação ao tempo é mostrada no gráfico da figura 02.

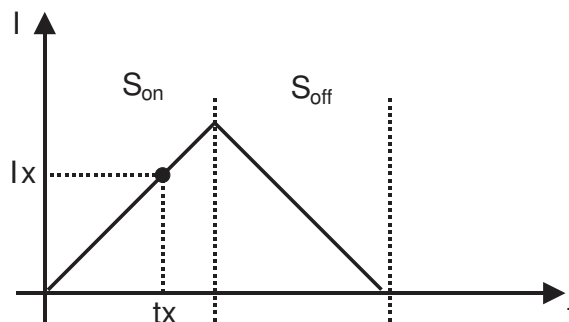


Figura 02: Gráfico da corrente I em função do tempo

Medindo-se o valor de I_x no tempo t_x , encontra-se o valor da indutância através da equação (1).

$$L = \frac{V \cdot t_x}{I_x} \quad (1)$$

A maior dificuldade deste método é a forma de medir a corrente de maneira que não haja interferência no circuito. Outro inconveniente é o valor elevado de corrente do indutor. Por exemplo, em uma alimentação de $15V$, e um indutor a ser medido de $10mH$, a corrente com $t_x = 4ms$ é de aproximadamente $6A$, o que torna inviável o circuito.

O segundo circuito estudado é mostrado na figura 03:

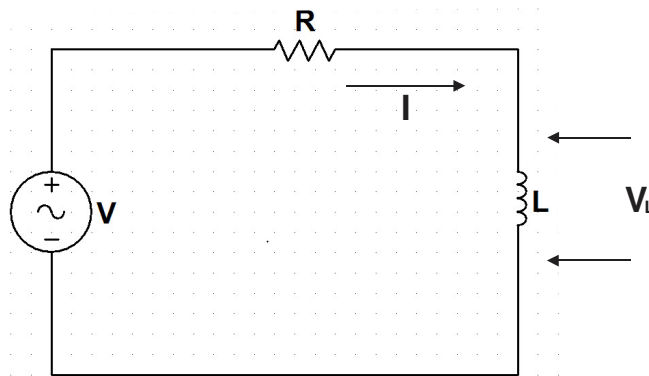


Figura 03: Segundo circuito estudado

No circuito da figura 03, V é uma tensão AC senoidal operando com uma frequência pré-determinada conforme ao valor da indutância. O circuito funciona como um divisor de tensão e as formas de onda do circuito podem ser observados na figura 04.

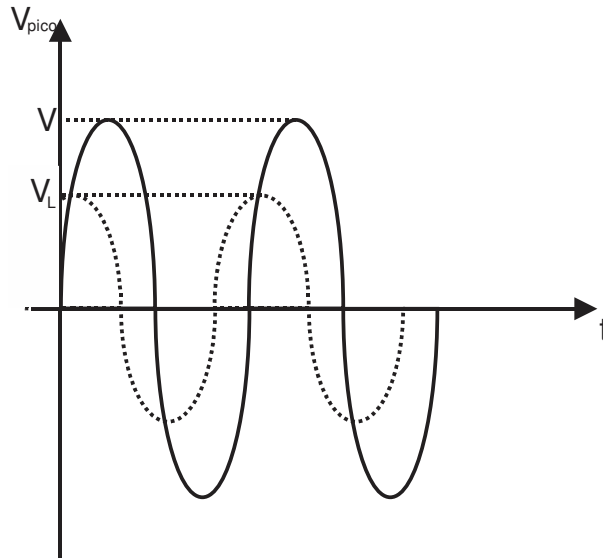


Figura 04: Tensão de Entrada (linha contínua) e tensão no indutor (linha pontilhada)

Sendo a tensão de pico de V conhecida, mede-se a tensão sobre o indutor V_L . O valor da reatância indutiva X_L será função do valor da tensão sobre o indutor (eq. 2).

$$X_L = \sqrt{\frac{V^2}{I^2} - R^2} \quad (2)$$

E por fim, a indutância pode ser conhecida através do valor da reatância indutiva (eq.3).

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{V^2}{I^2} - R^2} \quad (3)$$

Porem, para realizar medidas de escalas mais amplas de indutância, tanto a frequência quanto o valor da resistência em serie devem ser variadas consideravelmente.

A tabela 01, pode ser resumido os valores aproximados de frequência e resistência para diversas faixas de indutância.

L	f	X_L	R
100 μ H	200KHz	125 Ω	42 Ω
1mH	100KHz	628 Ω	410 Ω
10mH	100KHz	6,28K Ω	4,4K Ω
100mH	100KHz	62K Ω	68K Ω
1H	100KHz	630K Ω	950K Ω

Tabela 01: Faixas de indutância, com respectiva frequência de operação e resistência em serie.

Conforme a tabela 01, para realizar as medições de indutância, é necessário variar muito a frequência e a resistência, e os circuitos que realizam todas essas alterações se tornaram complexos comparados com alternativas que acabaram por ser adotadas e estudadas a seguir.

3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO CIRCUITO ADOTADO

O circuito que, afinal, foi adotado, funciona como um circuito similar ao mostrado na figura 05.

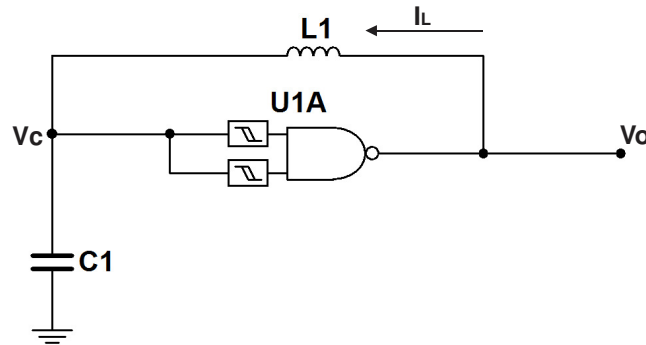


Figura 05: Circuito Oscilador LC com Schmitt Trigger.

Este circuito é um oscilador e possibilita a obtenção da indutância L a partir de sua frequência de oscilação.

O circuito da figura 05 utiliza uma porta CMOS AND Schmitt Trigger operando como inversor seus sinais característicos são apresentados na figura 06.

As características básicas de um schmitt trigger é a histerese apresentada no funcionamento da porta lógica. Conforme mostrado na figura 06, a tensão de saída da porta lógica V_O vai mudar de nível somente depois de ultrapassar uma tensão de histerese V_H . Portanto, à medida que V_C vai crescendo, o nível de saída só vai alterar para zero assim que V_C superar o valor de V_P . E à medida que V_C vai diminuindo, o nível de saída só vai alterar para nível alto assim que V_C superar o valor de V_N .

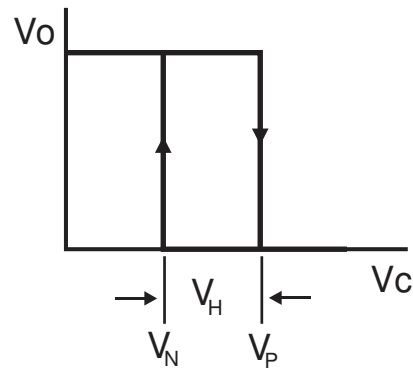


Figura 06: Curva $V_c \times V_o$

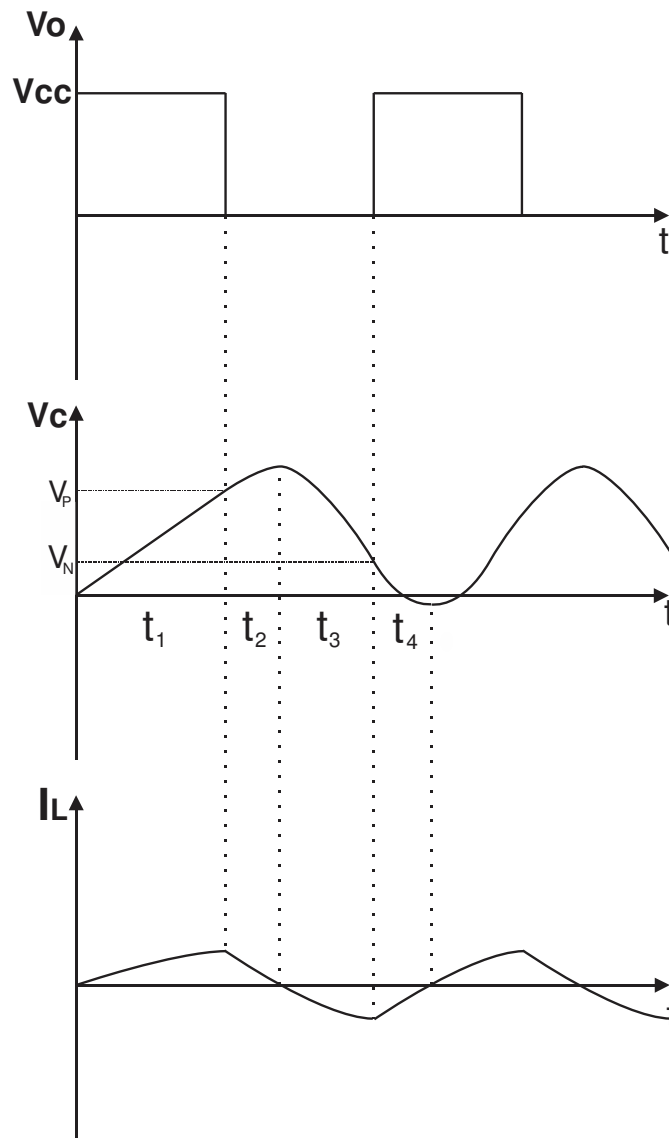


Figura 07: Formas de Ondas características do circuito oscilador LC com Schmitt Trigger

Ao iniciar a operação, o capacitor $C1$ e o indutor $L1$ estão descarregados, portanto tanto V_C quanto I_L são zero. Como V_C é zero, V_O está em nível alto, ou seja, em V_{CC} . Nessas condições, o circuito trabalha como um circuito LC serie com uma fonte de alimentação CC como representado na figura 08.

Durante o tempo t_1 apresentado na figura 07, a corrente do indutor I_L aumenta e tensão V_C sobre o capacitor também cresce. Quando a tensão do capacitor atinge o valor de V_P , que é a tensão de nível alto da histerese do schmitt trigger, o nível de saída do inversor passa ser baixo, portanto V_O passa a ser zero.

A partir desse ponto, o circuito trabalha como um circuito LC paralelo sem fonte de alimentação como é representado na figura 09.

Durante o tempo t_2 , a corrente do indutor I_L permanece no mesmo sentido, porem agora vai diminuindo, ou seja, descarregando no capacitor que permanece com a tensão crescendo. No fim do tempo t_2 , a corrente do indutor chega a zero, e a tensão sobre o capacitor V_C está no valor máximo.

Durante o tempo t_3 , o capacitor começa a descarga sobre o indutor, e a corrente I_L começa a crescer no sentido oposto. Quando a tensão V_C chegar ao nível de V_N , que é a tensão de nível baixo da histerese do schmitt trigger, o nível de saída do inversor passa a ser alto, e portanto, a tensão V_O passa ser novamente V_{CC} .

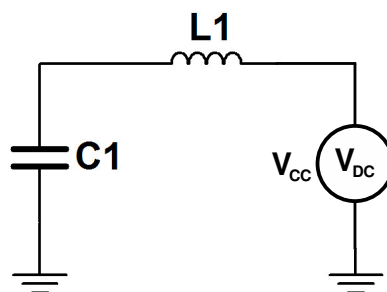


Figura 08: Circuito equivalente quando V_O está em nível alto

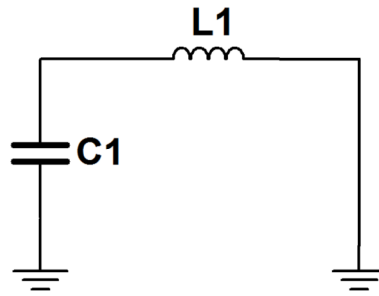


Figura 09: Circuito Equivalente quando V_O está em nível baixo

Durante o tempo t_3 , a corrente do indutor I_L começa a diminuir, mas mantém o mesmo sentido, descarregando sobre o capacitor que mantém por esse período a tensão V_C em queda. Quando a corrente I_L chegar a zero, o indutor passa a ser novamente carregado, fazendo com que a corrente I_L cresça, e com isso o capacitor também será carregado, fazendo com que o V_C cresça, iniciando o processo oscilatório novamente.

3.1 ANÁLISE TEÓRICA DO CIRCUITO LC

Para descobrir qual a relação da frequência de V_O com o valor do indutor $L1$, será realizada uma análise teórica deste circuito a seguir.

Como início de análise, será realizado o equacionamento dos circuitos equivalentes do oscilador LC . No caso quando V_O está em nível alto, o circuito equivalente foi visto na figura 08. Porém, para aproximar com um circuito real, vamos acrescentar uma resistência interna existente no indutor, como é mostrado na figura 10.

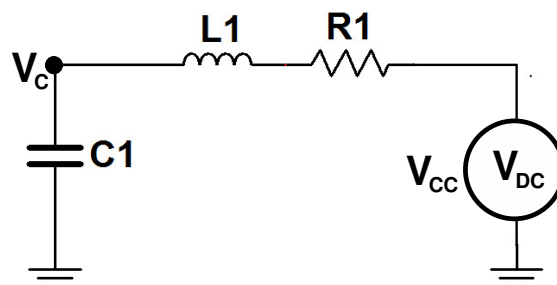


Figura 10: Circuito equivalente quando V_O está em nível alto com resistência interna do indutor

A resistência R_1 representa a resistência interna do indutor.

Conforme a lei de Kirchoff, a soma das tensões deve ser igual a zero. Portanto, podemos equacionar o circuito da figura 10:

$$V_{CC} = V_{C1} + V_{L1} + V_{R1} \quad (4)$$

Substituindo os termos para ficar tudo em função da tensão sobre o capacitor V_C :

$$V_{CC} = V_C(t) + L \cdot C \cdot \frac{d^2 V_C(t)}{dt^2} + R \cdot C \cdot \frac{dV_C(t)}{dt} \quad (5)$$

Através da equação (5), é obtida a equação diferencial que descreve o comportamento da tensão sobre o capacitor do circuito da figura 10.

$$\frac{d^2 V_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot V_C(t) = \frac{V_{CC}}{L \cdot C} \quad (6)$$

A solução da equação diferencial (6) é dado por:

$$V_C(t) = V_{CN}(t) + V_{CF}(t) \quad (7)$$

Onde V_{CN} é a resposta natural ou homogênea do sistema e V_{CF} é a resposta forçada.

Para essa equação diferencial de segunda ordem, a resposta homogênea é dada por:

$$\frac{d^2 V_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dV_C(t)}{dt} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot V_C(t) = 0 \quad (8)$$

Onde a equação característica que resolve a equação homogênea é escrita por:

$$\alpha^2 + \frac{R}{L} \cdot \alpha + \frac{1}{L \cdot C} = 0 \quad (9)$$

As raízes da equação característica são dadas por:

$$\alpha_1 = -\frac{R}{2 \cdot L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2 - \frac{1}{L \cdot C}} \quad (10)$$

$$\alpha_2 = -\frac{R}{2 \cdot L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2 \cdot L}\right)^2 - \frac{1}{L \cdot C}} \quad (11)$$

De acordo com as raízes da equação característica, a resposta pode ser superamortecida, ou seja raízes reais distintas, criticamente amortecida, raízes reais repetidas, ou subamortecida, raízes complexas conjugadas.

Como no circuito estudado, a resistência é muito baixa por se tratar de uma resistência interna de um indutor, o circuito fica no terceiro caso, e com isso, a resposta total do sistema é dada por:

$$V_C(t) = e^{\beta \cdot t} \cdot K \cdot \sin(\gamma \cdot t + \theta) + A \quad (12)$$

Onde as raízes da equação característica são dadas por:

$$\alpha_1 = \beta + j \cdot \gamma \quad (13)$$

$$\alpha_2 = \beta - j \cdot \gamma \quad (14)$$

Os termos K e θ são adquiridos através das condições iniciais $V_C(0)$ e $i(0)$. A resposta forçada que no caso da eq.(12) é a constante A , é a fonte de alimentação DC do circuito (V_{CC}).

Com a equação de $V_C(t)$, é obtido a equação de $i(t)$ através da primeira derivada:

$$i(t) = C \cdot \frac{dV_C(t)}{dt} = C \cdot K \cdot e^{\beta \cdot t} \cdot (\beta \cdot \sin(\gamma \cdot t + \theta) + \gamma \cdot \cos(\gamma \cdot t + \theta)) \quad (15)$$

Na figura 11 é apresentado o circuito equivalente com V_O em nível baixo.

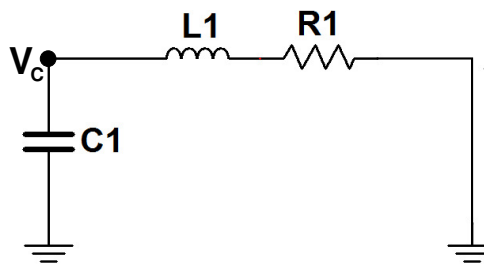


Figura 11: Circuito equivalente quando V_O está em nível baixo com resistência interna do indutor

O equacionamento deste circuito é realizado de forma análoga ao caso anterior, mudando somente que no caso não existe resposta forçada, somente a resposta homogênea:

$$V_C(t) = V_{CN}(t) \quad (16)$$

Portanto, a equação que descreve a tensão do capacitor em função do tempo no circuito da figura 11 é dada por:

$$V_C(t) = e^{\beta \cdot t} \cdot K \cdot \sin(\gamma \cdot t + \theta) \quad (17)$$

A corrente do circuito $i(t)$ é dado pela equação (15).

Com as equações encontradas, serão calculados os tempos que acontecerão as transições de V_O .

Primeiramente, para realizar o cálculo de forma numérica, definimos o valor do capacitor, da resistência e da tensão de alimentação.

$$C = 47nF, R = 1\Omega, V_{CC} = 15V \quad (18)$$

Através do datasheet da porta lógica CD4093 e com testes realizados com o circuito integrado utilizado, encontramos os valores de tensão de histerese característicos para uma tensão de alimentação de 15V:

$$V_N = 8,10V, V_P = 10V \quad (19)$$

Para encontrar a equação que rege cada período de tempo de V_C é necessário ter as condições iniciais. No entanto, as únicas condições iniciais que temos é que ao ligar o circuito, tanto a tensão sobre o capacitor quanto a corrente sobre o indutor serão zero. Portanto, as análises começarão com essas condições iniciais. Cada etapa de cálculo será realizada como uma interação, até que se perceba que os tempos de V_O em nível alto e V_O em nível baixo comecem a se repetir. Como o indutor é uma variável, será realizado para diversos valores de indutores para confirmação das equações finais.

3.2 CÁLCULO DA FUNÇÃO $V_C(t)$ COM $L = 0,1mH$

Com um indutor com o valor $L = 0,1mH$, são calculadas as raízes da equação característica pelas equações (10) e (11), resultando as seguintes raízes:

$$\alpha_1 = -5000 + j.461238,50 \quad (20)$$

$$\alpha_2 = -5000 - j.461238,50 \quad (21)$$

A equação (12) será a resposta da tensão do capacitor no circuito da figura 10 no período em que V_O fique em nível alto, ou seja, no instante que a tensão do capacitor atingir o nível de V_p , a equação de V_C vai mudar. Esse comportamento é chamado de t_1 na figura 07.

3.2.1 PRIMEIRA INTERAÇÃO

Na primeira interação, V_O está em nível alto, ou seja, em V_{cc} , e assim o circuito é representado pela figura 10. A equação que representa a tensão no capacitor é apresentada na equação (22).

$$V_C(t) = e^{-5000.t}.K.\sin(461238,50.t + \theta) + 15 \quad (22)$$

As condições iniciais dessa interação são:

$$V_C(0) = 0V, \quad I(0) = 0mA \quad (23)$$

Com as condições iniciais, os valores de K e θ da equação:

$$V_C(t) = e^{-5000.t}.(-15).\sin(461238,50.t + 1,56) + 15 \quad (24)$$

Essa equação gera a curva mostrada na figura 12, onde o tempo em que a tensão no capacitor chega a $10V$, que é o valor de V_p , é $t = 2,682\mu s$.

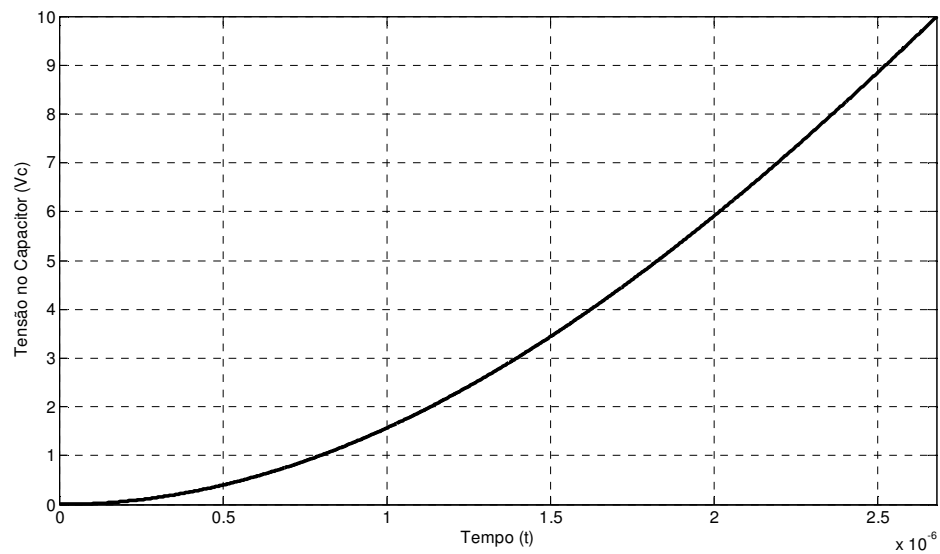


Figura 12: Tensão do Capacitor x Tempo – Primeira Interação

$$V_C(2,682\mu s) = e^{-5000 \cdot 2,682\mu s} \cdot (-15) \cdot \sin(461238,50 \cdot 2,682\mu s + 1,56) + 15 \quad (25)$$

$$V_C(2,682\mu s) = 10V \quad (26)$$

Através da equação (27), o comportamento da corrente no circuito é descrito por:

$$i(t) = C \cdot -15 \cdot e^{-5000 \cdot t} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot t + 1,56) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot t + 1,56)) \quad (27)$$

Assim, o valor da corrente do circuito no fim do período é calculada:

$$i(2,682\mu s) = 47nF \cdot -15 \cdot e^{-5000 \cdot 2,682\mu s} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot 2,682\mu s + 1,56) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot 2,682\mu s + 1,56)) \quad (28)$$

$$i(2,682\mu s) = 303,16mA \quad (29)$$

A curva da corrente pelo tempo é apresentada na figura 13.

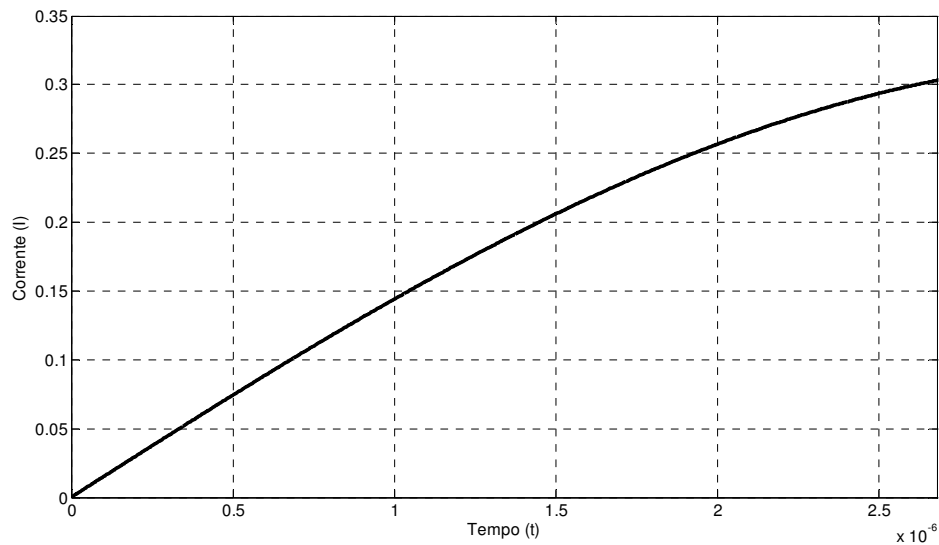


Figura 13: Corrente no Indutor x Tempo – Primeira Interação

3.2.2 SEGUNDA INTERAÇÃO

Na segunda interação, V_O está em nível baixo, ou seja, em zero, e assim o circuito é representado pela figura 11. A equação que representa a tensão no capacitor é apresentada na equação (30).

$$V_C(t) = e^{-5000.t} \cdot K \cdot \sin(461238,50.t + \theta) \quad (30)$$

E as condições iniciais utilizadas nessa nova interação serão as condições finais da interação anterior. Para facilitar os cálculos, o tempo será considerado novamente zero a partir desse ponto. Portanto, as condições iniciais dessa nova interação serão:

$$V_C(0) = 10V, \quad i(0) = 303,16mA \quad (31)$$

Com essas condições iniciais, é adquirido a equação que rege esse período do circuito:

$$V_C(t) = e^{-5000.t} \cdot 17,28 \cdot \sin(461238,50.t + 0,62) \quad (32)$$

E assim é possível traçar o gráfico de V_C em função do tempo, visto na figura 14, até que a tensão do capacitor chegue ao valor de V_N , onde assim a tensão V_O volte a ter nível alto, e novamente o circuito muda de comportamento.

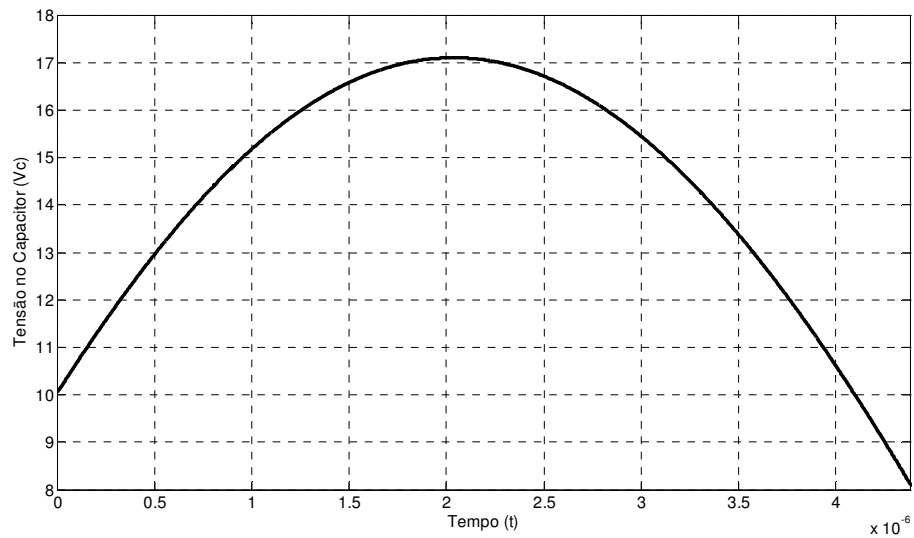


Figura 14 – Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Segunda Interação

Onde o tempo em que a tensão no capacitor chega a 8,10V, que é o valor de V_N , é $t = 4,38\mu s$.

$$V_C(4,38\mu s) = e^{-5000 \cdot 4,38\mu s} \cdot (17,28) \cdot \sin(461238,50 \cdot 4,38\mu s + 0,62) \quad (33)$$

$$V_C(4,38\mu s) = 8,12V \quad (34)$$

E a corrente do circuito pela equação (15) nesse tempo é dado por:

$$i(4,38\mu s) = 47nF \cdot 17,28 \cdot e^{-5000 \cdot 4,38\mu s} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot 4,38\mu s + 0,62) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot 4,38\mu s + 0,62)) \quad (35)$$

$$i(4,38\mu s) = -323,28mA \quad (36)$$

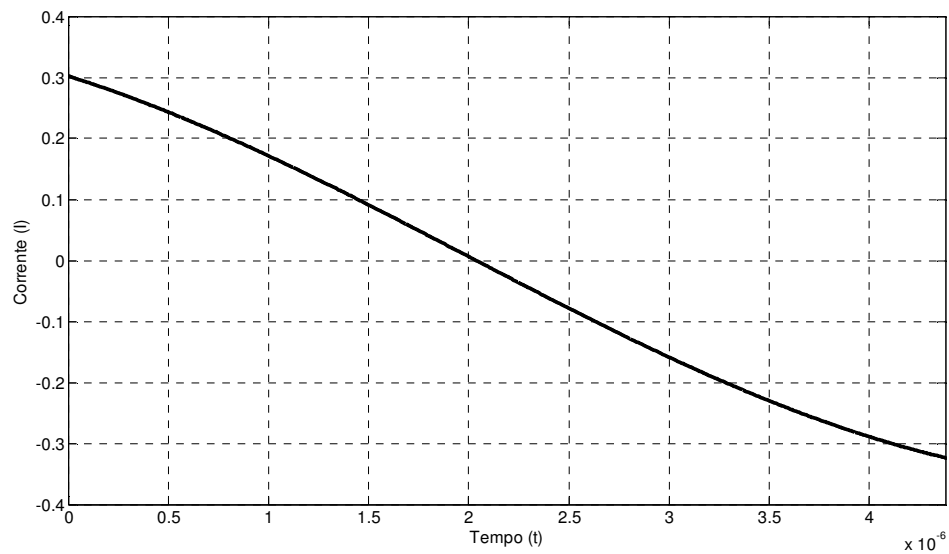


Figura 15: Corrente no Indutor x Tempo – Segunda Interação

3.2.3 TERCEIRA INTERAÇÃO

Na terceira interação, V_O está em nível alto, ou seja, em V_{CC} , e assim o circuito é representado pela figura 10. A equação que representa a tensão no capacitor é apresentada na equação (37).

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . K . \sin(461238,50 . t + \theta) + 15 \quad (37)$$

As condições iniciais dessa interação são:

$$V_C(0) = 8,12V, \quad I(0) = -323,28mA \quad (38)$$

Com as condições iniciais, os valores de K e θ da equação:

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . (-16,49) . \sin(461238,50 . t + 0,43) + 15 \quad (39)$$

Essa equação gera a curva mostrada na figura 16, aonde o tempo em que a tensão no capacitor chega a $10V$, que é o valor de V_p , é $t = 5,19\mu s$.

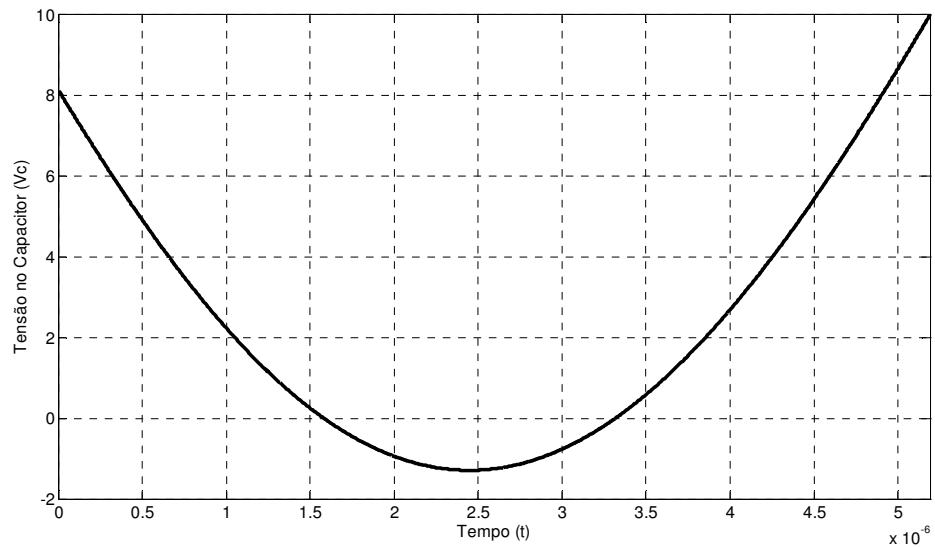


Figura 16 – Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Terceira Interação

$$V_C(5,19\mu s) = e^{-5000 \cdot 5,19\mu s} \cdot (-16,49) \cdot \sin(461238,50 \cdot 5,19\mu s + 0,43) + 15 \quad (40)$$

$$V_C(5,19\mu s) = 10V \quad (41)$$

Através da equação (15), o comportamento da corrente no circuito é descrito por:

$$i(t) = C \cdot -16,49 \cdot e^{-5000 \cdot t} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot t + 0,43) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot t + 0,43)) \quad (42)$$

Assim, o valor da corrente do circuito no fim do período é calculado:

$$i(5,19\mu s) = 47nF \cdot -16,49 \cdot e^{-5000 \cdot 5,19\mu s} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot 5,19\mu s + 0,43) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot 5,19\mu s + 0,43)) \quad (43)$$

$$i(5,19\mu s) = 332,06mA \quad (44)$$

A curva da corrente pelo tempo é apresentada na figura 17.

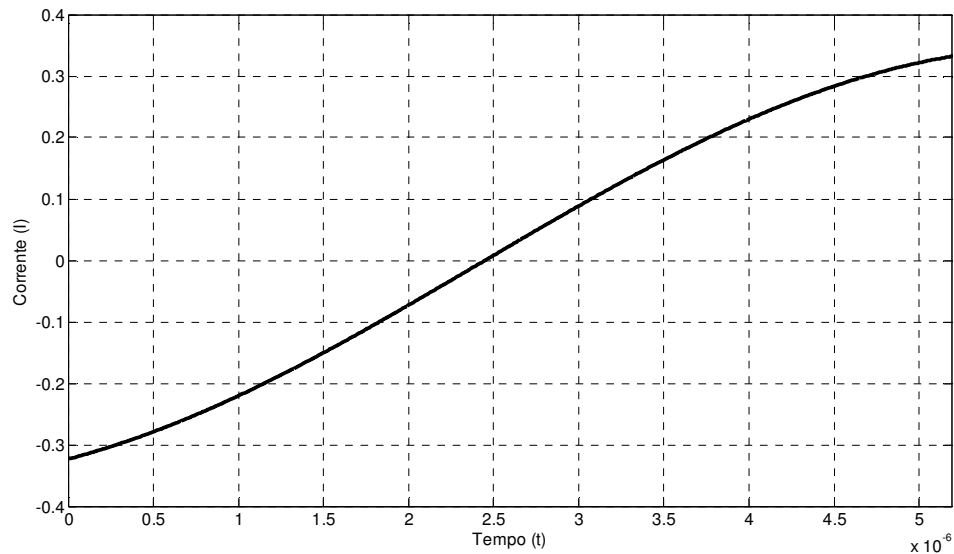


Figura 17: Corrente no Indutor x Tempo – Terceira Interação

3.2.4 QUARTA INTERAÇÃO

Na quarta interação, V_O está em nível baixo, ou seja, em zero, e assim o circuito é representado pela figura 11. A equação que representa a tensão no capacitor é apresentada na equação (45).

$$V_C(t) = e^{-5000.t}.K.\sin(461238,50.t + \theta) \quad (45)$$

E as condições iniciais utilizadas nessa nova interação serão as condições finais da interação anterior. Para facilitar os cálculos, o tempo será considerado novamente zero a partir desse ponto. Portanto, as condições iniciais dessa nova interação serão:

$$V_C(0) = 10V, \quad i(0) = 332,06mA \quad (46)$$

Com essas condições iniciais, é adquirida a equação que rege esse período do circuito:

$$V_C(t) = e^{-5000.t}.18,38.\sin(461238,50.t + 0,57) \quad (47)$$

E assim é possível traçar o gráfico de V_C em função do tempo, visto na figura 18, até que a tensão do capacitor chegue ao valor de V_N , onde assim a tensão V_O volte a ter nível alto, e novamente o circuito muda de comportamento.

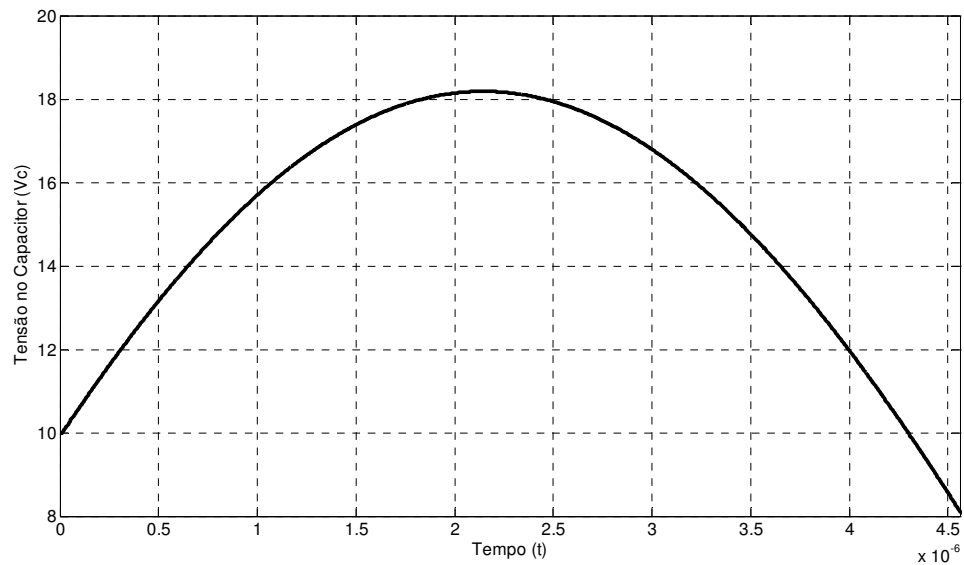


Figura 18 – Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Quarta Interação

Aonde o tempo em que a tensão no capacitor chega a 8,10V, que é o valor de V_N , é $t = 4,56\mu s$.

$$V_C(4,56\mu s) = e^{-5000 \cdot 4,56\mu s} \cdot (18,38) \cdot \sin(461238,50 \cdot 4,56\mu s + 0,57) \quad (47)$$

$$V_C(4,56\mu s) = 8,12V \quad (48)$$

E a corrente do circuito pela equação (15) nesse tempo é:

$$i(4,56\mu s) = 47nF \cdot 18,38 \cdot e^{-5000 \cdot 4,56\mu s} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot 4,56\mu s + 0,57) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot 4,56\mu s + 0,57)) \quad (49)$$

$$i(4,56\mu s) = -349,43mA \quad (50)$$

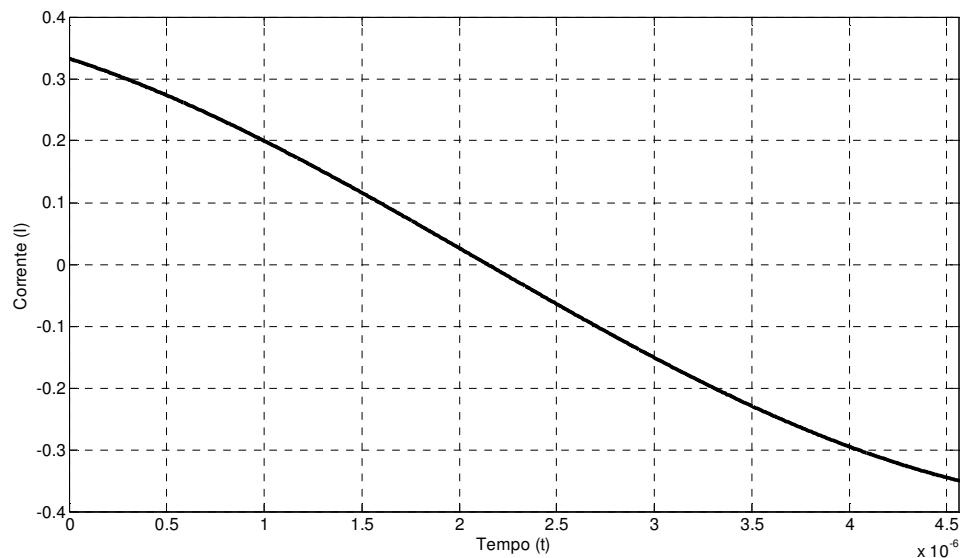


Figura 19: Corrente no Indutor x Tempo – Quarta Interação

3.2.5 QUINTA INTERAÇÃO

Na quinta interação, V_O está em nível alto, ou seja, em V_{CC} , e assim o circuito é representado pela figura 10. A equação que representa a tensão no capacitor é apresentada na equação (51).

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . K . \sin(461238,50 . t + \theta) + 15 \quad (51)$$

As condições iniciais dessa interação são:

$$V_C(0) = 8,12V, \quad I(0) = -349,43mA \quad (52)$$

Com as condições iniciais, os valores de K e θ da equação:

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . (-17,59) . \sin(461238,50 . t + 0,40) + 15 \quad (53)$$

Essa equação gera a curva mostrada na figura 20, aonde o tempo em que a tensão no capacitor chega a $10V$, que é o valor de V_p , é $t = 5,30\mu s$.

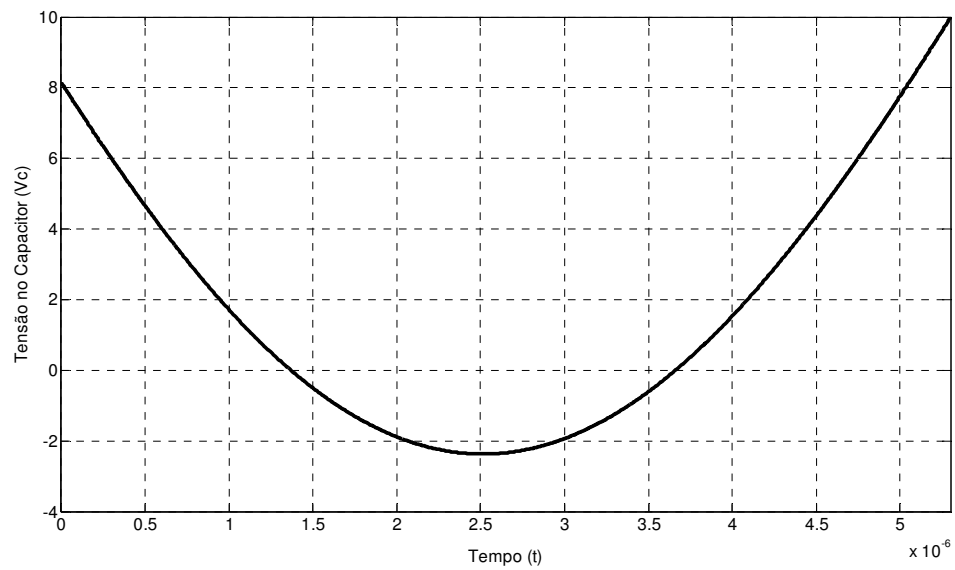


Figura 20 – Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Quinta Interação

$$V_C(5,30\mu s) = e^{-5000 \cdot 5,30\mu s} \cdot (-17,59) \cdot \sin(461238,50 \cdot 5,30\mu s + 0,40) + 15 \quad (54)$$

$$V_C(5,30\mu s) = 10V \quad (55)$$

Através da equação (15), o comportamento da corrente no circuito é descrito por:

$$i(t) = C \cdot -17,59 \cdot e^{-5000 \cdot t} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot t + 0,40) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot t + 0,40)) \quad (56)$$

Assim, o valor da corrente do circuito no fim do período é calculado:

$$i(5,30\mu s) = 47nF \cdot -17,59 \cdot e^{-5000 \cdot 5,30\mu s} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot 5,30\mu s + 0,40) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot 5,30\mu s + 0,40)) \quad (57)$$

$$i(5,30\mu s) = 356,26mA \quad (58)$$

A curva da corrente pelo tempo é apresentada na figura 21.

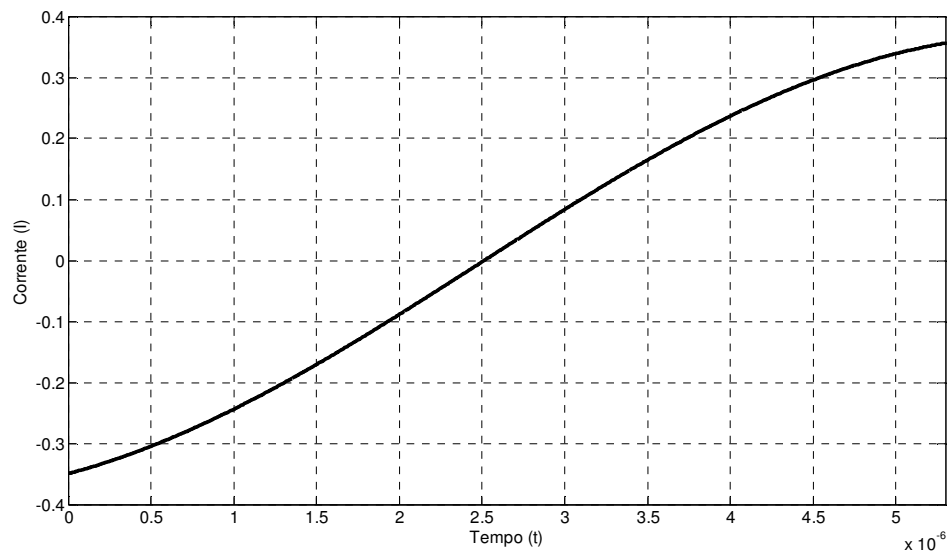


Figura 21: Corrente no Indutor x Tempo – Quinta Interação

3.2.6 SEXTA INTERAÇÃO

Na sexta interação, V_O está em nível baixo, ou seja, em zero, e assim o circuito é representado pela figura 11. A equação que representa a tensão no capacitor é apresentada na equação (58).

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . K . \sin(461238,50 . t + \theta) \quad (58)$$

E as condições iniciais utilizadas nessa nova interação serão as condições finais da interação anterior. Para facilitar os cálculos, o tempo será considerado novamente zero a partir desse ponto. Portanto, as condições iniciais dessa nova interação serão:

$$V_C(0) = 10V, \quad i(0) = 356,26mA \quad (59)$$

Com essas condições iniciais, é adquirida a equação que rege esse período do circuito:

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . 19,33 . \sin(461238,50 . t + 0,54) \quad (60)$$

E assim é possível traçar o gráfico de V_C em função do tempo, visto na figura 22, até que a tensão do capacitor chegue ao valor de V_N , onde assim a tensão V_O volte a ter nível alto, e novamente o circuito muda de comportamento.

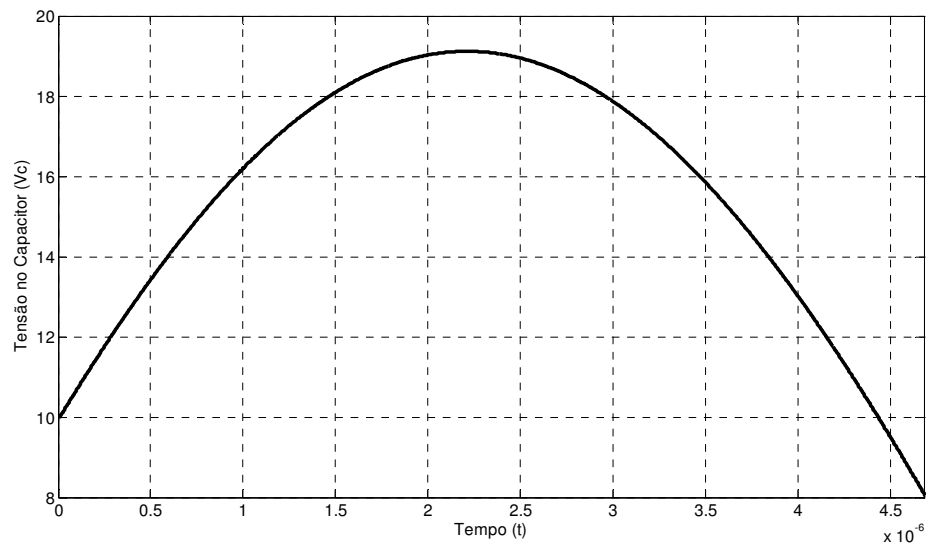


Figura 22 – Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Sexta Interação

Aonde o tempo em que a tensão no capacitor chega a $8,10V$, que é o valor de V_N , é $t = 4,68\mu s$.

$$V_C(4,68\mu s) = e^{-5000 \cdot 4,68\mu s} \cdot (19,33) \cdot \sin(461238,50 \cdot 4,68\mu s + 0,54) \quad (61)$$

$$V_C(4,68\mu s) = 8,12V \quad (62)$$

E a corrente do circuito pela equação (15) nesse tempo é:

$$i(4,68\mu s) = 47nF \cdot 19,33 \cdot e^{-5000 \cdot 4,68\mu s} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot 4,68\mu s + 0,54) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot 4,68\mu s + 0,54)) \quad (63)$$

$$i(4,68\mu s) = -371,74mA \quad (64)$$

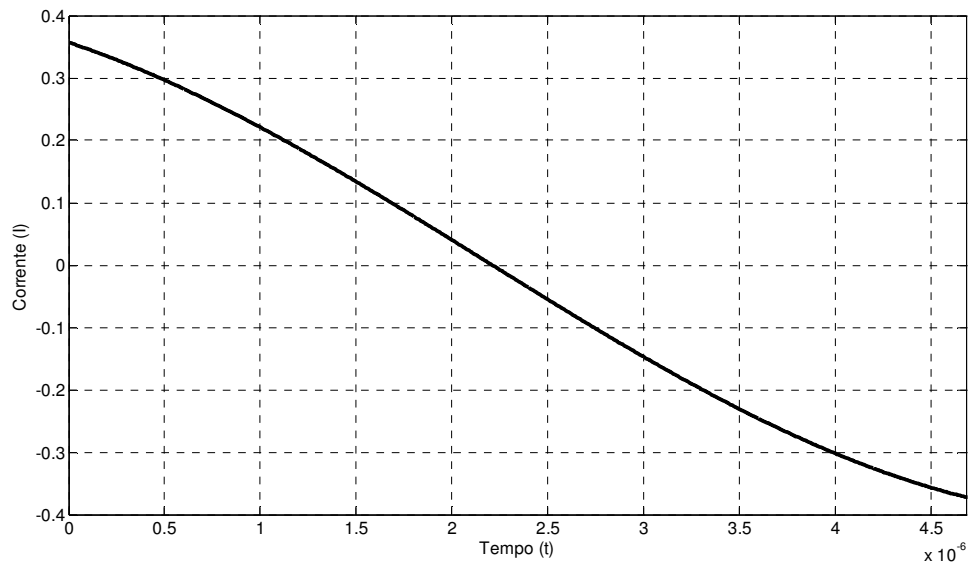


Figura 23: Corrente no Indutor x Tempo – Sexta Interação

3.2.7 SÉTIMA INTERAÇÃO

Na sétima interação, V_O está em nível alto, ou seja, em V_{CC} , e assim o circuito é representado pela figura 10. A equação que representa a tensão no capacitor é apresentada na equação (65).

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . K . \sin(461238,50 . t + \theta) + 15 \quad (65)$$

As condições iniciais dessa interação são:

$$V_C(0) = 8,12V, \quad I(0) = -371,74mA \quad (66)$$

Com as condições iniciais, os valores de K e θ da equação:

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . (-18,55) . \sin(461238,50 . t + 0,38) + 15 \quad (67)$$

Essa equação gera a curva mostrada na figura 24, aonde o tempo em que a tensão no capacitor chega a $10V$, que é o valor de V_p , é $t = 5,38\mu s$.

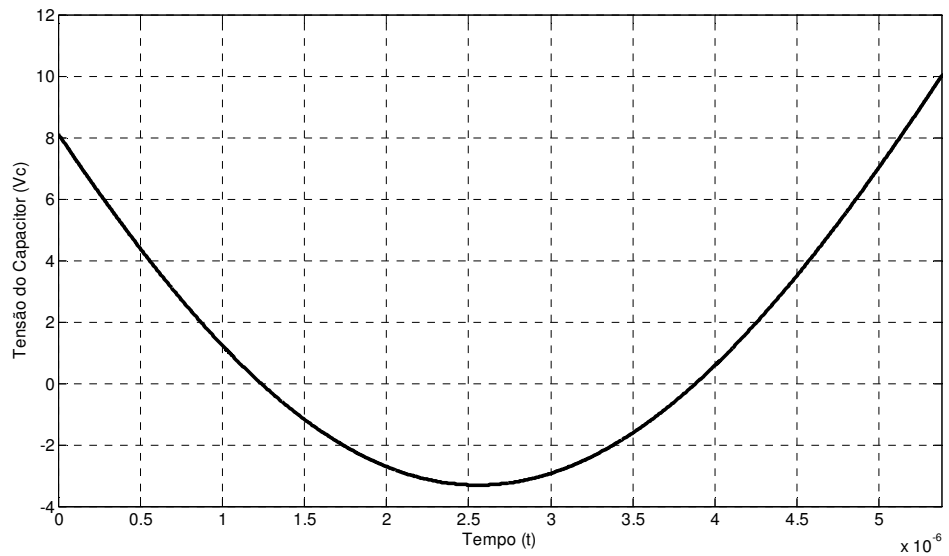


Figura 24 – Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Sétima Interação

$$V_C(5,38\mu s) = e^{-5000 \cdot 5,38\mu s} \cdot (-18,55) \cdot \sin(461238,50 \cdot 5,38\mu s + 0,38) + 15 \quad (68)$$

$$V_C(5,38\mu s) = 10V \quad (69)$$

Através da equação (15), o comportamento da corrente no circuito é descrito por:

$$i(t) = C \cdot -18,55 \cdot e^{-5000 \cdot t} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot t + 0,38) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot t + 0,38)) \quad (70)$$

Assim, o valor da corrente do circuito no fim do período é calculado:

$$i(5,38\mu s) = 47nF \cdot -18,55 \cdot e^{-5000 \cdot 5,38\mu s} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot 5,38\mu s + 0,38) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot 5,38\mu s + 0,38)) \quad (71)$$

$$i(5,38\mu s) = 377,37mA \quad (72)$$

A curva da corrente pelo tempo é apresentada na figura 25.

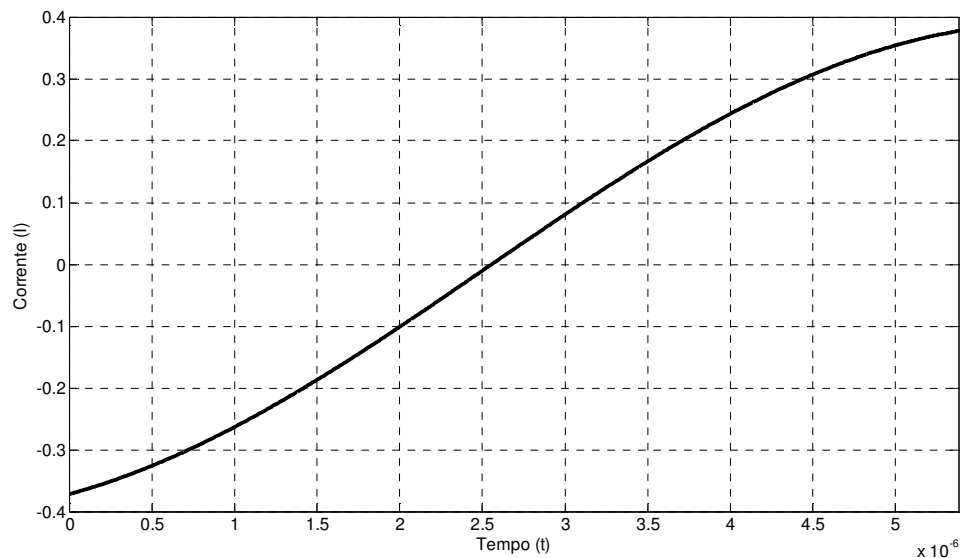


Figura 25: Corrente no Indutor x Tempo – Sétima Interação

3.2.8 OITAVA INTERAÇÃO

Na oitava interação, V_O está em nível baixo, ou seja, em zero, e assim o circuito é representado pela figura 11. A equação que representa a tensão no capacitor é apresentada na equação (72).

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . K . \sin(461238,50 . t + \theta) \quad (72)$$

E as condições iniciais utilizadas nessa nova interação serão as condições finais da interação anterior. Para facilitar os cálculos, o tempo será considerado novamente zero a partir desse ponto. Portanto, as condições iniciais dessa nova interação serão:

$$V_C(0) = 10V, \quad i(0) = 377,37mA \quad (73)$$

Com essas condições iniciais, é adquirida a equação que rege esse período do circuito:

$$V_C(t) = e^{-5000.t} . 20,17 . \sin(461238,50 . t + 0,52) \quad (74)$$

E assim é possível traçar o gráfico de V_C em função do tempo, visto na figura 26, até que a tensão do capacitor chegue ao valor de V_N , onde assim a tensão V_O volte a ter nível alto, e novamente o circuito muda de comportamento.

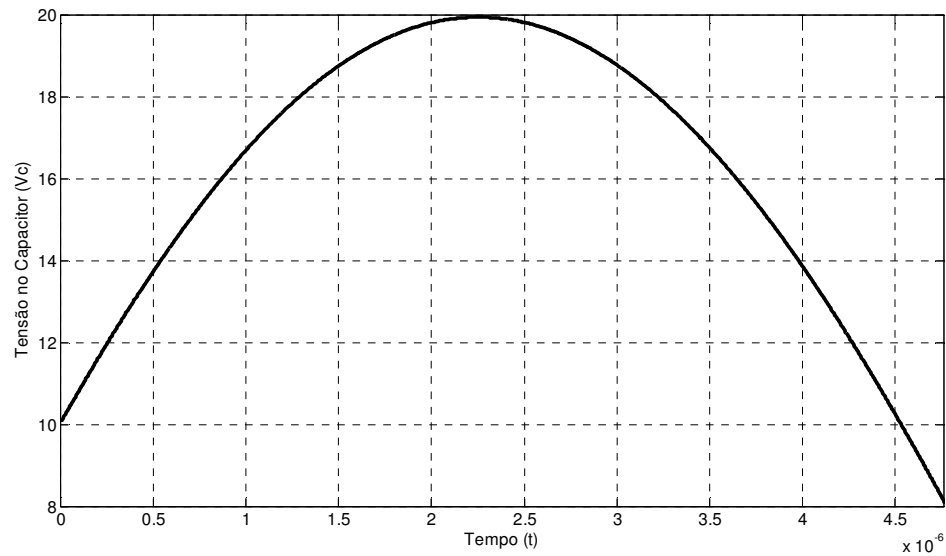


Figura 26 – Tensão no Capacitor (V_C) x Tempo (t) – Oitava Interação

Aonde o tempo em que a tensão no capacitor chega a 8,10V, que é o valor de V_N , é $t = 4,76\mu s$.

$$V_C(4,76\mu s) = e^{-5000 \cdot 4,76\mu s} \cdot (20,17) \cdot \sin(461238,50 \cdot 4,76\mu s + 0,52) \quad (75)$$

$$V_C(4,76\mu s) = 8,12V \quad (76)$$

E a corrente do circuito pela equação (15) nesse tempo é:

$$i(4,76\mu s) = 47nF \cdot 20,17 \cdot e^{-5000 \cdot 4,76\mu s} \cdot (-5000 \cdot \sin(461238,50 \cdot 4,76\mu s + 0,52) + 461238,50 \cdot \cos(461238,50 \cdot 4,76\mu s + 0,52)) \quad (77)$$

$$i(4,76\mu s) = -390,70mA \quad (78)$$

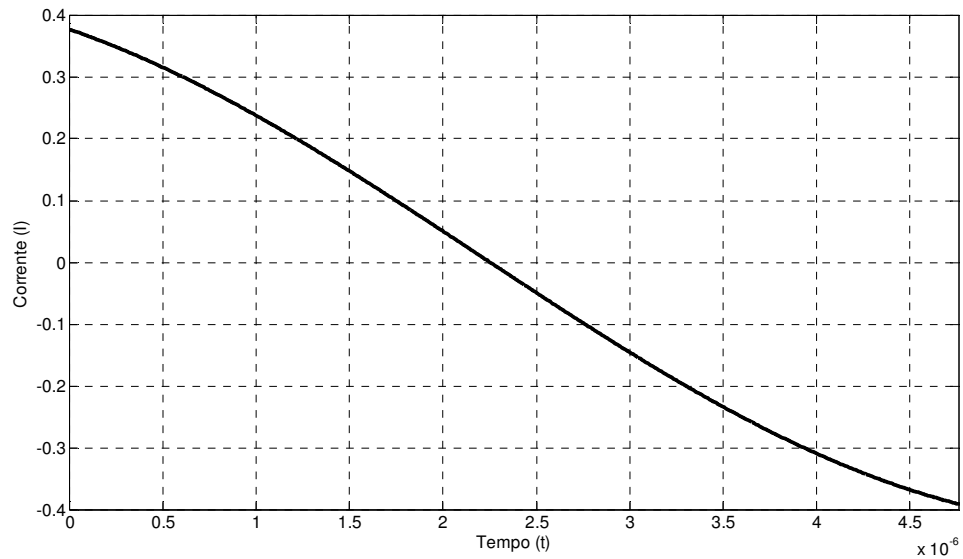


Figura 27: Corrente no Indutor x Tempo – Oitava Interação

Portanto, após a oitava interação, o tempo de V_O em nível baixo será de $4,76 \mu\text{s}$ e o tempo de V_O em nível alto será de $5,38 \mu\text{s}$. A frequência do sinal V_O é dada por:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10,14 \mu\text{s}} = 98619 \text{ Hz} \quad (79)$$

3.3 CÁLCULO DA FUNÇÃO $V_C(t)$ COM $L = 1 \text{ mH}$

De forma análoga ao item 3.2, foi calculada a frequência de saída do circuito oscilador, agora com um indutor de 1 mH . Primeiramente foram calculadas as raízes da equação característica pelas equações (10) e (11).

$$\alpha_1 = -500 + j.145864,13 \quad (80)$$

$$\alpha_2 = -500 - j.145864,13 \quad (81)$$

A equação (82) determina a característica do circuito quando V_O está em nível alto.

$$V_C(t) = e^{-500.t} . K . \sin(145864,13 . t + \theta) + 15 \quad (82)$$

E a equação (83) determina a característica do circuito quando V_O está em nível baixo.

$$V_C(t) = e^{-500.t} . K . \sin(145864,13 . t + \theta) \quad (83)$$

Com essas equações e realizando interações como no caso anterior, é obtido o valor da frequência da onda retangular de V_O .

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{32,3\mu s} = 30945Hz \quad (84)$$

3.4 CÁLCULO DA FUNÇÃO $V_C(t)$ COM $L = 10mH$

De forma análoga ao item 3.2, foi calculada a frequência de saída do circuito oscilador, agora com um indutor de $10mH$. Primeiramente são calculadas as raízes da equação características pelas equações (10) e (11).

$$\alpha_1 = -50 + j . 46126,53 \quad (85)$$

$$\alpha_2 = -50 - j . 46126,53 \quad (86)$$

A equação (87) determina a característica do circuito quando V_O está em nível alto.

$$V_C(t) = e^{-50.t} . K . \sin(46126,53 . t + \theta) + 15 \quad (87)$$

E a equação (88) determina a característica do circuito quando V_O está em nível baixo.

$$V_C(t) = e^{-50.t} . K . \sin(46126,53 . t + \theta) \quad (88)$$

Com essas equações e realizando interações como no caso anterior, é obtido o valor da frequência da onda retangular de V_O .

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{102,64\mu s} = 9743Hz \quad (89)$$

3.5 CÁLCULO DA FUNÇÃO $V_C(t)$ COM $L = 50mH$

De forma análoga ao item 3.2, foi calculada a frequência de saída do circuito oscilador, agora com um indutor de $50mH$. Primeiramente foram calculadas as raízes da equação característica pelas equações (10) e (11).

$$\alpha_1 = -10 + j.20628,42 \quad (90)$$

$$\alpha_2 = -10 - j.20628,42 \quad (91)$$

A equação (92) determina a característica do circuito quando V_O está em nível alto.

$$V_C(t) = e^{-10.t}.K.\sin(20628,42.t + \theta) + 15 \quad (92)$$

E a equação (93) determina a característica do circuito quando V_O está em nível baixo.

$$V_C(t) = e^{-10.t}.K.\sin(20628,42.t + \theta) \quad (93)$$

Com essas equações e realizando interações como no caso anterior, é obtido o valor da frequência da onda retangular de V_O .

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{229.6\mu s} = 4355Hz \quad (94)$$

3.6 CÁLCULO DA RESPOSTA DE FREQUÊNCIA DO CIRCUITO OSCILADOR

A partir dos resultados obtidos anteriormente, conclui-se que a frequência de oscilação do circuito da figura 05 é dada aproximadamente por:

$$f \cong 0,21 \frac{1}{\sqrt{L.C}} \quad (95)$$

Na tabela é apresentada uma comparação do valor teórico da frequência com o valor calculado com a equação de aproximação.

L	0,1mH	1mH	10mH	50mH
F (valor teórico)	98618 Hz	30945 Hz	9743 Hz	4355 Hz
$0,21 \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$	96870 Hz	30630 Hz	9687 Hz	4332 Hz
Erro	1,77%	1,02%	0,57%	0,53%

Tabela 02: Comparação dos valores de frequência

A conclusão importante de todo esse estudo é que:

$$L \propto \frac{1}{f^2} \quad (96)$$

Ou seja:

$$L = \frac{K}{f^2} \quad (97)$$

Onde o K poderá ser ajustado para reduzir ao máximo o erro na hora da medição, como será tratado mais a frente.

4 PROJETO DA PARTE ANALÓGICA

Na figura 28 está apresentado o circuito completo da parte analógica do projeto.

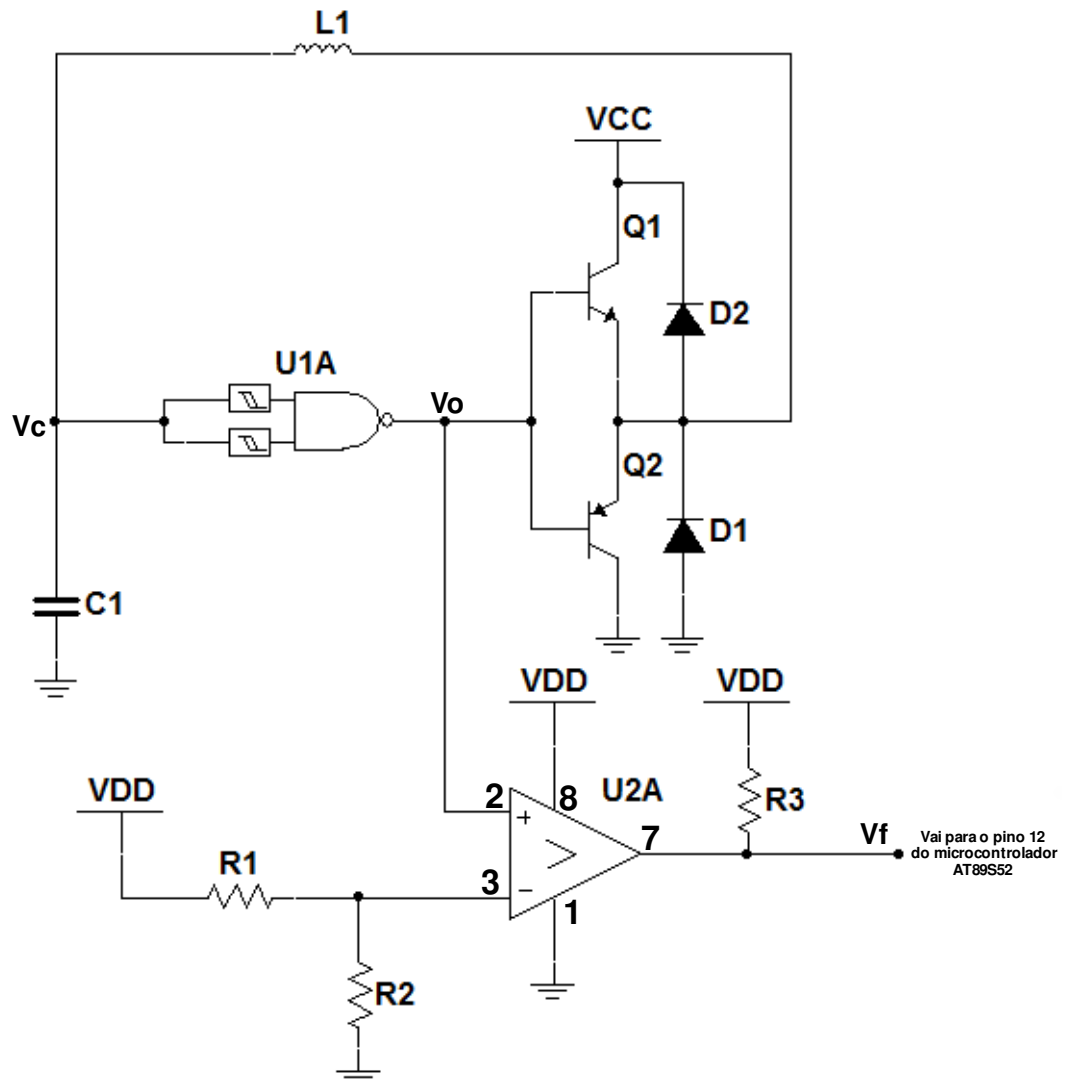


Figura 28: Circuito Completo da Parte Analógico

4.1 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

O Primeiro a ser descrito é a fonte de alimentação que gera as tensões V_{CC} e V_{DD} . O circuito da fonte de alimentação está apresentado na figura 29.

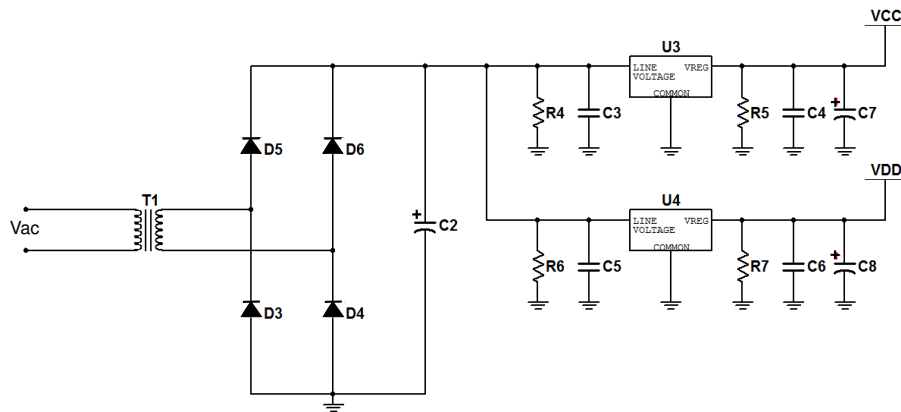


Figura 29: Fonte de Alimentação

Foi utilizado duas alimentações no circuito pelo fato que para a tensão de histerese da porta lógica com schmitt trigger ser maior, é necessário utilizar uma tensão mais alta. A tensão mais alta que se pode usar neste circuito integrado CMOS é $15V$, que se tornou a alimentação V_{CC} . Para alimentar o circuito digital do microcontrolador e LCD, é necessário uma alimentação de $5V$, que é a alimentação de V_{DD} .

4.2 OSCILADOR LC

A primeira parte do circuito analógico apresentado na figura 30 é o circuito oscilador LC. Seu estudo detalhado já foi feito no capítulo anterior. Serão agora definidos os componentes utilizados nesse circuito.

O primeiro componente é o indutor L_1 . Trata-se justamente da variável do sistema. O indutor que se deseja medir será inserido ao circuito. Devido as características do circuito, os indutores suportados para medição são da faixa de $0,1mH$ até $400mH$.

O segundo componente é o capacitor C_1 . É o componente que vai trabalhar com o indutor para gerar a frequência de oscilação. Como será trabalhado com indutâncias na faixa de 0,1mH até 400mH, deve-se colocar no circuito um capacitor que gere frequências de no máximo alguns quilohertz. Frequências muito altas propiciam a interferências externas ou por capacitâncias parasitas, e por isso serão evitadas nesse projeto. Pelas análises teóricas realizadas no capítulo anterior, o capacitor que se adequou a essas características possui o valor de 47nF.

4.3 BUFFER

A corrente exigida para alimentar o circuito LC é elevada para os padrões de uma porta lógica CMOS. Para resolver esse problema, foi inserido ao circuito um sistema de buffer de corrente com dois transistores Q1 e Q2 indicado na figura 30. Para os menores valores de indutância medidos pelo circuito, a corrente máxima de pico pode alcançar valores de 400mA como mostrado na equação (78). Os transistores utilizados foram o BC548 e BC 558 que segundo o datasheet, possuem ganhos na faixa de 150. Com isso, a corrente exigida da porta lógica fica próximo a 2,5mA, aceitável para um CMOS.

4.4 REDUTOR DE TENSÃO

A tensão V_O mostrado na figura 28 é um sinal retangular com tensão máxima de 15V. Esse sinal será lido pelo microcontrolador, porem, deve ser com tensão máxima de 5V. Por isso a utilização do comparador U2A alimentado por 5V, gerando o sinal V_f que possui a mesma frequência de V_O porem com a amplitude de 5V.

A tensão de referencia aplicado ao pino 3 do comparador U2A é ajustada pelo divisor de tensão entre os resistores R1 e R2. Essa tensão de referencia foi ajustada para 3V.

O comparador utilizado foi o LM311. Para a tensão de referencia, foi utilizado um trimpot de $10k\Omega$ que foi ajustado para $R1 = 4K\Omega$ e $R2 = 6K\Omega$. O resistor $R3$ é um resistor de pull up com valor de $10k\Omega$.

5 PROJETO DA PARTE DIGITAL

O microcontrolador utilizado foi o AT89S52 da Atmel que foi escolhido por muitas experiências em projetos anteriores.

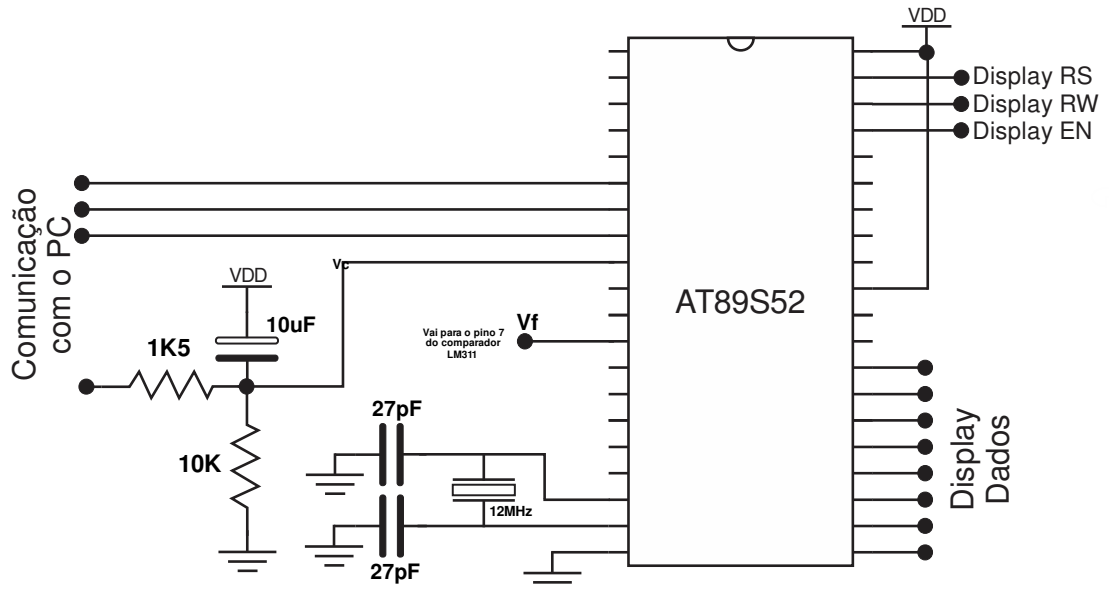


Figura 30: Circuito Digital

Outra grande facilidade é a simplicidade da plataforma de gravação deste componente. É necessário somente ligar os pinos MOSI, MISO, SCK e RST à porta paralela LPT1 de um micro computador, e realizar a conversação e gravação deste componente. O diagrama de gravação pode ser visto na figura 31:

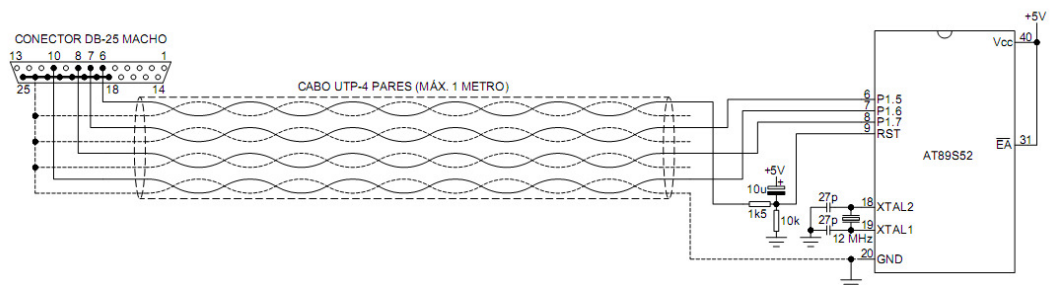


Figura 31: Circuito de Gravação do AT89S52

Com o microcontrolador conectado ao PC, pode ser utilizado o programa *In System Programming Software* do fabricante AEC Electronics para realizar a gravação do programa na memória do AT89S52.

5.1 PLATAFORMA DE PROGRAMAÇÃO E COMPILAÇÃO

Para realizar a programação foi utilizada a linguagem Assembly, mais comum na família dos microcontrolador 8051.

O programa foi escrito e compilado no software μ vision v3 fabricado pela Keil Elektronik GmbH.

5.2 FLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO

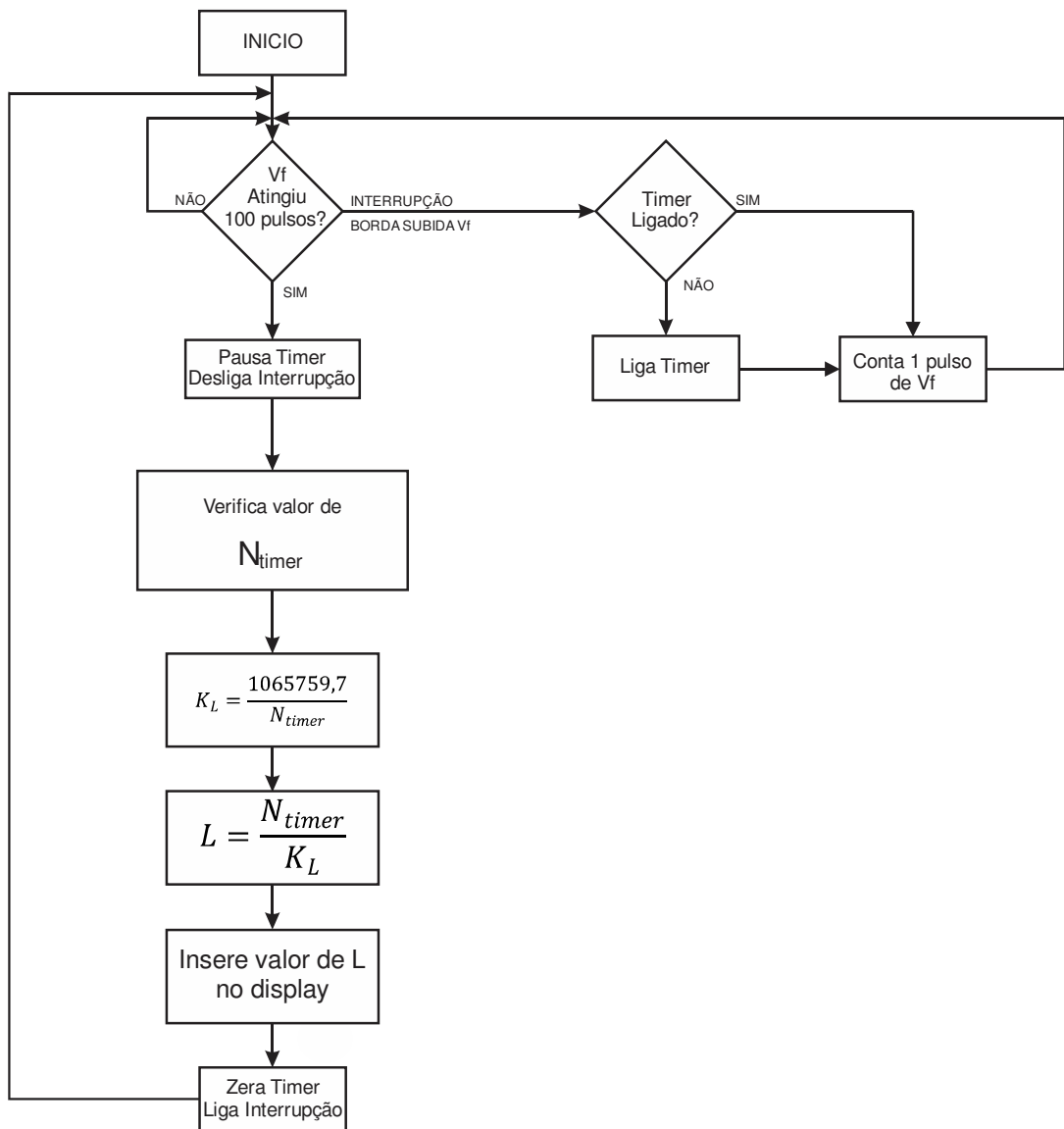


Figura 32: Fluxograma de operação do programa

Ao iniciar o programa, primeiramente serão carregadas todas as informações internas como configurações de temporizadores, interrupções e ports de saída. Também serão feitas as configurações do display LCD.

Passando essas rotinas básicas, o microcontrolador ficará constantemente verificando se a contagem de pulsos da oscilação gerada pelo circuito LC (V_f) chegou a 100. Durante essa

varredura, interrupções vão acontecendo a cada borda de subida da onda retangular do circuito LC (V_f). Na primeira interrupção, o timer (N_{timer}) é ligado e a cada interrupção que acontece, o microcontrolador conta que ocorreu um pulso.

Chegando a 100 pulsos de V_f , o timer é pausado e as interrupções são desligadas para que ocorra o processamento dos dados sem cortes.

Como o clock do microcontrolador é de $12MHz$, podemos saber quanto tempo equivale cada incremento do temporizador. Primeiro, o período do pulso do clock T_{clock} pode ser calculado da seguinte forma:

$$T_{clock} = \frac{1}{f_{clock}} = \frac{1}{12MHz} = 83,33ns \quad (98)$$

O tempo t_{timer} e cada incremento do contador do AT89S52 equivale a uma instrução, e cada instrução é executada com 12 pulsos de clock, ou seja:

$$t_{timer} = T_{clock} \cdot 12 = 83,33ns \cdot 12 = 1\mu s \quad (99)$$

O programa conta quantos pulsos de $1\mu s$ (t_{timer}) ocorrem em 100 pulsos do oscilador da figura 05. O resultado é chamado N_{timer} e portanto vale:

$$N_{timer} = \frac{T \cdot 100}{1\mu s} = \frac{\sqrt{L \cdot C}}{0,21} \cdot 10^8 \quad (100)$$

Então:

$$L = (N_{timer})^2 \cdot \frac{(0,21)^2}{C \cdot (10^8)^2} \quad (101)$$

E para $C = 47nF$ tem-se:

$$L = (N_{timer})^2 \cdot \frac{(0,21)^2}{47 \cdot 10^{-9} \cdot (10^8)^2} = (N_{timer})^2 \cdot 9,38 \cdot 10^{-11} \quad (102)$$

Por essa equação apresentada, o valor da indutância se dá em Henry (H). Como a amostragem do display se dará em miliHenry (mH) e mais um dígito significativo, devemos multiplicar a equação por 10^4 .

$$L = (N_{timer})^2 \cdot 9,38 \cdot 10^{-7} \quad (103)$$

Na figura 33 é apresentado o gráfico da indutância em função do número de contagem do timer.

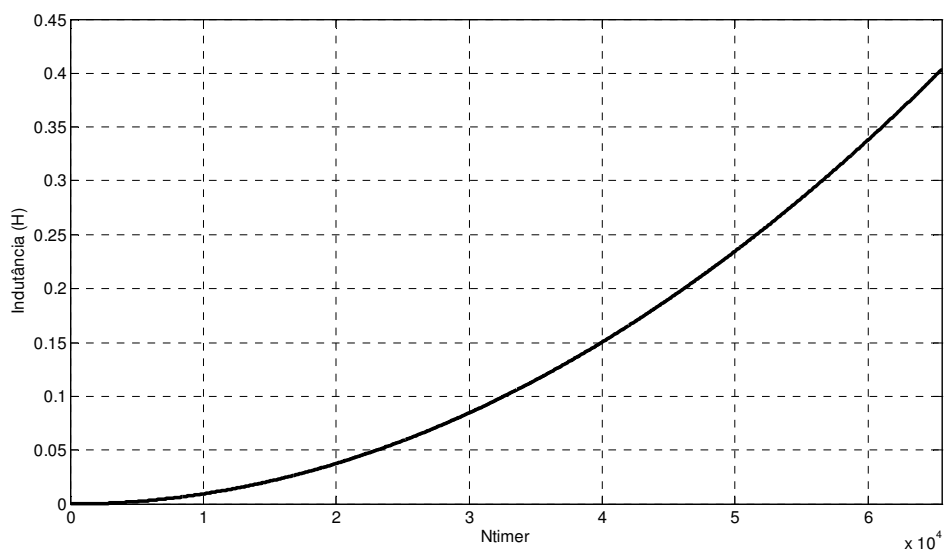


Figura 33: Indutância x Contagem do Timer

Para linearizar o sistema, podemos separar a equação em duas partes:

$$L = N_{timer} \cdot N_{timer} \cdot 9,38 \cdot 10^{-7} \quad (104)$$

Definindo K_L de acordo com a equação (105):

$$K_L = \frac{1}{N_{timer} \cdot 9,38 \cdot 10^{-7}} = \frac{1066098}{N_{timer}} \quad (105)$$

A indutância L fica de acordo com a equação (106):

$$L = \frac{N_{timer}}{K_L} \quad (106)$$

É dividida a equação (103) em duas partes por dois motivos. Primeiro, por se tratar de um microcontrolador de 8 bits, não seria possível realizar operações matemáticas com números tão grandes. Segundo, os valores de K_L são previamente calculados para todos os valores de N_{Timer} e salvos em uma tabela interna na memória do microcontrolador.

O valor de N_{Timer} contém 16 bits, porém por motivo de simplificação, utilizou-se somente os 8 bits mais significativos para criar a tabela do K_L , apresentada na tabela 3.

Assim sendo, o microcontrolador irá buscar o valor de K_L correspondente ao valor do N_{Timer} lido. Por exemplo, se o valor de N_{Timer} lido é de $31812d$, seu correspondente em hexadecimal é $7C44h$. Portanto, os oito bits mais significativos são $7Ch$, que formaria o número em decimal $31744d$. Verificando a tabela 3, o K_L utilizado será 33 (linha 7, coluna C). Neste mesmo exemplo, o valor de indutância L conforme a equação (106) será 935. Como esse valor está em Henry $\times 10^{-4}$ ($L \cdot 10^{-4}$), o valor apresentado no display será de $93,5mH$.

4 bits mais significativos do Ntimer (hexadecimal)	0	4164	2082	1388	1041	833	694	595	521	463	416	379	347	320	297	278	260
	1	245	231	219	208	198	189	181	174	167	160	154	149	144	139	134	130
	2	126	122	119	116	113	110	107	104	102	99	97	95	93	91	89	87
	3	85	83	82	80	79	77	76	74	73	72	71	69	68	67	66	65
	4	64	63	62	61	60	59	59	58	57	56	56	55	54	53	53	52
	5	51	51	50	50	49	48	48	47	47	46	46	45	45	44	44	43
	6	43	42	42	42	41	41	40	40	40	39	39	39	38	38	38	37
	7	37	37	36	36	36	35	35	35	34	34	34	34	33	33	33	33
	8	32	32	32	32	31	31	31	31	30	30	30	30	30	29	29	29
	9	29	29	28	28	28	28	28	27	27	27	27	27	27	26	26	26
	A	26	26	26	25	25	25	25	25	24	24	24	24	24	24	24	24
	B	24	23	23	23	23	23	23	23	22	22	22	22	22	22	22	22
	C	22	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	20	20	20	20	20
	D	20	20	20	20	20	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
	E	19	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	17	17	17
	F	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16

Tabela 03: Tabela do K_L

5.3 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

Na sequência, será descrito completamente o programa na linguagem Assembler.

Antes de tudo, foram definidas as variáveis que serão utilizadas no programa:

```

TEMPO EQU 0D
LCD EQU P2
D0 EQU P2.0
D1 EQU P2.1
D2 EQU P2.2
D3 EQU P2.3
D4 EQU P2.4
D5 EQU P2.5
D6 EQU P2.6
D7 EQU P2.7
EN EQU P0.2
RW EQU P0.1
RS EQU P0.0
VARA EQU 0F0AH
VARB EQU 0F0BH
VARC EQU 0F0CH
VARD EQU 0F0DH

```

Em sequencia, o início do programa e as respectivas faixas de memória onde o programa vai prosseguir, no caso das interrupções.

```

PRE_START:
    ORG 0000H
    JMP START

    ORG 0003H
    JMP INTER
    RETI

```

A seguir vêm as configurações internas do AT89S52. Nessas instruções foram configuradas as interrupções e os timers. Foi habilitada a interrupção externa 0 sendo usada em borda de subida e é nesse ponto que o sinal do oscilador LC é aplicado. Foram configurados também os timers 0 e 1 para trabalhar com 16 bits. O timer 0 é utilizado como opção de algum atraso necessário durante o programa e o timer 1 é o contador usado para medir o período dos pulsos do oscilador LC.

```

    ORG 0040H
START:
    MOV IE,#80H
    MOV IP,#01H
    MOV TCON,#01H
    MOV TMOD,#11H
    CLR C

```

Ainda em configurações, só que agora, são as configurações do display de LCD. A primeira instrução LCALL CHECK é uma rotina criada para verificar se o display está pronto para receber as informações que serão enviadas a seguir. Essa rotina lê um bit gerado pelo

LCD indicando quando está pronto. Essa rotina evita erros de informações entre microcontrolador e LCD. Será executada sempre quando houver essas trocas de informações.

A primeira instrução enviada ao LCD habilita o funcionamento em 8 bits, compatível com o AT89S52 e habilita o funcionamento das duas linhas. Em sequência ele é configurado para trabalhar com incremento de memória e sem correr os valores pelo display. Depois é ligado o display e desabilitado o cursor piscante. E por último, todos os valores de memória são zerados e coloca-se o cursor na primeira posição, aguardando o primeiro caractere.

```

LCALL CHECK
CLR EN
CLR RW
CLR RS
MOV LCD, #38H
SETB EN
LCALL CHECK
CLR EN
CLR RW
CLR RS
MOV LCD, #06H
SETB EN
LCALL CHECK
CLR EN
CLR RW
CLR RS
MOV LCD, #0CH
SETB EN
LCALL CHECK
CLR EN
CLR RW
CLR RS
MOV LCD, #01H
SETB EN
LCALL CHECK

```

Logo após as configurações do microcontrolador e do display, aparece uma mensagem inicial no LCD.

```

WRITE_STR:
    MOV R0, #7D
    MOV DPTR, #0500H
    LCALL WRITE_NOW
WRITE_STR2:
    MOV LCD, #0C0H
    SETB EN
    LCALL CHECK
    MOV R0, #7D
    MOV DPTR, #0510H
    LCALL WRITE_NOW
    LCALL TIMER
    LCALL CLEAR

```

Após a mensagem inicial, são inseridos os textos contínuos de funcionamento durante as medições. É escrito a palavra INDUTANCIA na primeira linha, e no final da segunda linha é inserido a unidade de medida assim como o ponto divisor das casas decimais como apresentado na figura 34.

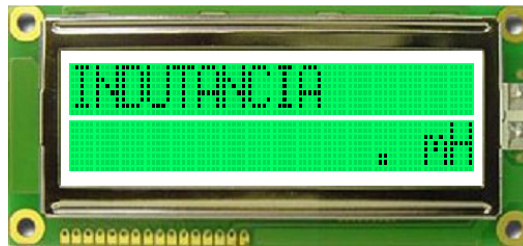


Figura 34: Display de LCD

```

WRITE_STR3:
  MOV IE,#80H
  MOV IP,#01H
  MOV TCON,#01H
  MOV TMOD,#11H
  LCALL TIMER
  MOV R1,#00H
  MOV R2,#00H
  CLR C
  LCALL CHECK
  MOV R0,#10D
    MOV DPTR,#0520H
  LCALL WRITE_NOW
WRITE_STR4:
  MOV LCD,#0CEH
  SETB EN
  LCALL CHECK
  MOV R0,#2D
    MOV DPTR,#0540H
  LCALL WRITE_NOW
  MOV LCD,#0CCH
  SETB EN
  LCALL CHECK
  MOV A,#2EH
  LCALL WRITE_LCD

```

Depois, são inseridos os valores iniciais nos registradores. Os registradores R2 ao R5 iniciam com o valor de $\#30H$, pois se trata do caractere '0' que será inserido no display. À medida que esse valor é incrementado, o caractere também é incrementado até $\#39H$ que representa o caractere '9'. O registrador R2 representa o dígito menos significativo enquanto o registrador R5 representa o dígito mais significativo.

O registrador R1 é responsável por incrementar a cada pedido de interrupção, ou seja, esse registrador armazena a contagem atual até chegar ao centésimo ciclo do oscilador.

Já os registradores R6 e R7 são os responsáveis por armazenar os 16 bits da contagem do timer 1.

```
ZERAR:
MOV R1,#00H
MOV R2,#30H
MOV R3,#30H
MOV R4,#30H
MOV R5,#30H
MOV R6,#00H
MOV R7,#00H
MOV VARA,#38D
MOV VARB,#0FFH
MOV VARC,#03H
JMP TESTE
```

A próxima é a rotina de teste, no qual fica aguardando quando ocorre alguma interrupção e direciona para escrever o valor numérico no display assim que passar os cem ciclos do oscilador LC.

```
TESTE:
SETB EX0
JC WRITE_STR5
DJNZ VARB,TESTE
MOV VARB,#0FFH
JMP ESCREVE
JMP TESTE
```

Em seguida vem a parte do programa que converte o valor do tempo de cem ciclos do oscilador em um valor numérico equivalente à indutância em miliHenry. O registrador R7 representa os oito bits mais significativos do timer 1 enquanto o registrador R6 representa os oito bits menos significativos do timer 1. O registrador B representa o valor da tabela de K_L correspondente ao valor da medida. Assim sendo, os registradores R2 ao R5 serão incrementados até o valor da indutância que representa.

```
WRITE_STR5:
MOV VARA,B
K01:
DJNZ R6,J01
DJNZ R7,J02
JMP ESCREVE
J02:
MOV R6,#0FFH
```

```

JMP K01

J01:
    DJNZ VARA,K01
    MOV VARA,B
    INC R2
    CJNE R2,#3AH,K01
    MOV R2,#30H
    INC R3
    CJNE R3,#3AH,K01
    MOV R3,#30H
    INC R4
    CJNE R4,#3AH,K01
    MOV R4,#30H
    INC R5
    CJNE R5,#3AH,K01
    MOV R5,#30H
    ;JMP K01
    LCALL WRITE_STR6
    JMP TESTE

```

A próxima rotina é responsável por escrever os valores dos registradores R2, R3, R4 e R5 no LCD. Os valores contidos nessas memórias já serão caracteres numéricos que deixará então o LCD completo com o valor do indutor medido.

```

ESCREVE:
    MOV LCD, #0C9H
    SETB EN
    LCALL CHECK
    MOV A,R5
        LCALL WRITE_LCD
    MOV A,R4
        LCALL WRITE_LCD
    MOV A,R3
        LCALL WRITE_LCD
    MOV LCD, #0CDH
    SETB EN
    LCALL CHECK
    MOV A,R2
        LCALL WRITE_LCD
    JMP WRITE_STR3

```

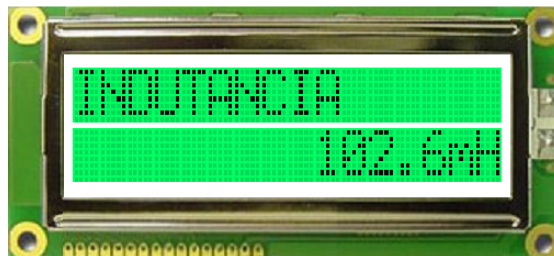


Figura 35: Exemplo de Medição no Display de LCD

Na sequencia, é mostrada a rotina de interrupção, que é responsável por ligar o timer 1 e desliga-lo após 100 ciclos do oscilador LC. É nessa rotina que os valores do timer são inseridos nos registradores R6 e R7.

```

INTER:
    SETB TR1
    INC R1
    CJNE R1,#100D,CONT
    CLR TR1
    CLR EX0
    SETB C
    MOV R1,#00H
    MOV R6,TL1
    MOV R7,TH1
    MOV A,TH1
    LCALL DADOS
    MOV TL1,#00H
    MOV TH1,#00H
CONT:
    RETI

```

Na sequencia têm uma serie de rotinas utilizadas para diversas funções no programa. A primeira é a rotina `WRITE_NOW` que tem por função organizar caracteres de textos que serão escritos no LCD. A rotina `CLEAR` é usada para apagar todos os caracteres do display de LCD. A rotina `WRITE_STR6` é usada para escrever no display uma mensagem quando a medição ultrapassar a medida máxima do instrumento, que está na faixa de 400mH. A rotina `DADOS` que tem por finalidade buscar na tabela de correção o valor correspondente da constante de linearização K_L e inserir no registrador B.

A próxima é a rotina do timer 0 responsável por gerar um atraso quando necessário. Existe também a rotina `CHECK`, que como explicado anteriormente, é usada para verificar se o LCD está pronto para receber informação do microcontrolador. E por último a rotina `WRITE_LCD`, que é usado para enviar cada caractere para o LCD.

```

ORG 0200H

WRITE_NOW:
    CLR A
    MOVC A, @A + DPTR
    LCALL WRITE_LCD
    INC DPTR
    DJNZ R0, WRITE_NOW

CLR EN
CLR RS
CLR RW

```

```

RET

CLEAR:
    CLR  EN
    CLR  RW
    CLR  RS
    MOV  LCD, #01H
    SETB EN
    LCALL CHECK
RET

WRITE_STR6:
    LCALL CHECK
    MOV  LCD, #0C2H
    SETB EN
    LCALL CHECK
    MOV  R0, #9D
        MOV  DPTR, #0560H
    LCALL WRITE_NOW
RET

DADOS:
    MOV  DPTR, #0600H
    MOVC A, @A + DPTR
    MOV  B, A
    RET

TIMER:
    MOV  R1, #20D

TIMER2:
    MOV  TL0, #LOW(TEMPO)
    MOV  TH0, #HIGH(TEMPO)
    SETB TR0
    JNB  TF0, $
    CLR  TR0
    CLR  TF0
    DJNZ R1, TIMER2
    RET

CHECK:
    CLR  EN
    CLR  RS
    SETB RW
    MOV  LCD, #0FFH
    SETB EN
    JB   D7, CHECK
    CLR  EN
    CLR  RW
    RET

WRITE_LCD:
    CLR  EN
    CLR  RW
    SETB RS
    MOV  LCD, A
    SETB EN
    LCALL CHECK
    RET

```

E por último no programa temos os dados internos de memória. Aqui constam as informações que serão escritas no LCD assim como a tabela de calibração do instrumento.

Depois da posição 600H de memória está a tabela de calibração que consta com 256 valores, que ligam o valor medido do tempo com um valor de constante de linearização K_L .

INTERNAL_DATA:

ORG 0500H
DB 'LEANDRO'

ORG 0510H
DB 'QUINTAO'

ORG 0520H
DB 'INDUTANCIA'

ORG 0540H
DB 'mH'

ORG 0560H
DB '> QUE 400'

ORG 0600H
DB 255D, 255D, 255D, 255D, 255D, 255D, 255D, 255D, 249D, 219D, 183D, 160D, 125D, 110D, 109D, 108D
DB 107D, 106D, 105D, 104D, 103D, 102D, 101D, 100D, 99D, 98D, 97D, 96D, 95D, 94D, 93D, 92D
DB 91D, 88D, 86D, 84D, 81D, 79D, 77D, 75D, 73D, 72D, 70D, 68D, 67D, 65D, 64D, 63D
DB 61D, 60D, 59D, 58D, 57D, 56D, 55D, 54D, 53D, 52D, 51D, 50D, 49D, 49D, 48D, 47D
DB 46D, 46D, 45D, 44D, 44D, 43D, 42D, 42D, 41D, 41D, 40D, 40D, 39D, 39D, 38D, 38D
DB 37D, 37D, 36D, 36D, 35D, 35D, 35D, 34D, 34D, 33D, 33D, 33D, 31D, 31D, 31D, 31D
DB 31D, 31D, 30D, 30D, 30D, 29D, 29D, 29D, 29D, 28D, 28D, 28D, 28D, 28D, 28D, 27D
DB 27D, 26D, 26D, 26D, 26D, 26D, 26D, 26D, 26D, 26D, 25D, 25D, 25D, 25D, 25D, 24D
DB 24D, 24D, 24D, 24D, 24D, 23D, 23D, 23D, 23D, 23D, 23D, 22D, 22D, 22D, 22D, 22D
DB 22D, 22D, 21D, 21D, 21D, 21D, 20D, 20D, 20D, 20D, 19D, 19D, 19D, 19D, 19D, 19D
DB 19D, 19D, 18D, 18D, 18D, 18D, 18D, 18D, 18D, 18D, 18D, 17D, 17D, 17D, 17D, 17D
DB 17D, 17D, 17D, 17D, 17D, 17D, 16D, 16D, 16D, 16D, 16D, 16D, 16D, 16D, 16D, 16D
DB 16D, 16D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 15D, 14D
DB 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 14D, 13D, 13D
DB 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D, 13D
DB 13D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D, 12D

END

6 RESULTADOS ALCANÇADOS

Este capítulo está destinado a apresentar o resultado final do projeto após a implementação e os testes realizados comparando com um instrumento comercial.

6.1 MONTAGEM

Na figura 36 está apresentada a montagem do circuito analógico. O fio verde é o sinal V_f que ligará o circuito analógico com o circuito digital.

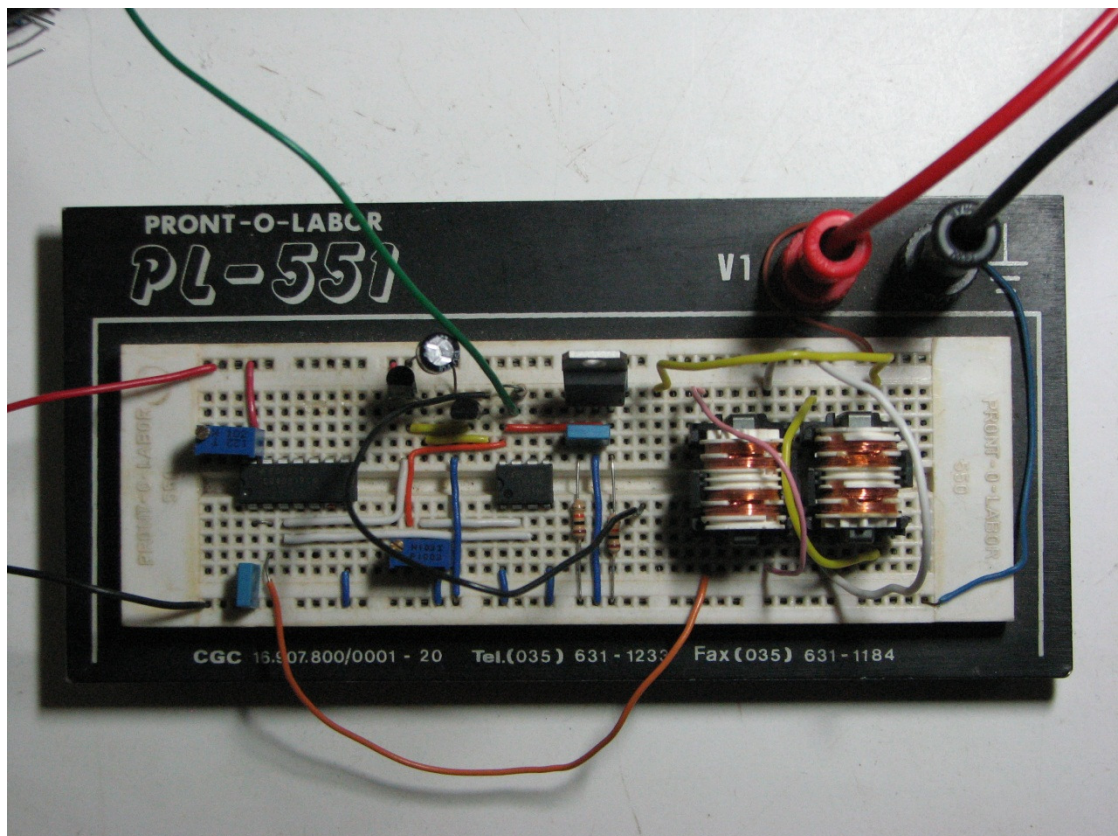


Figura 36: Montagem do Circuito Analógico

Na figura 37 está apresentado o circuito digital com as ligações do display.

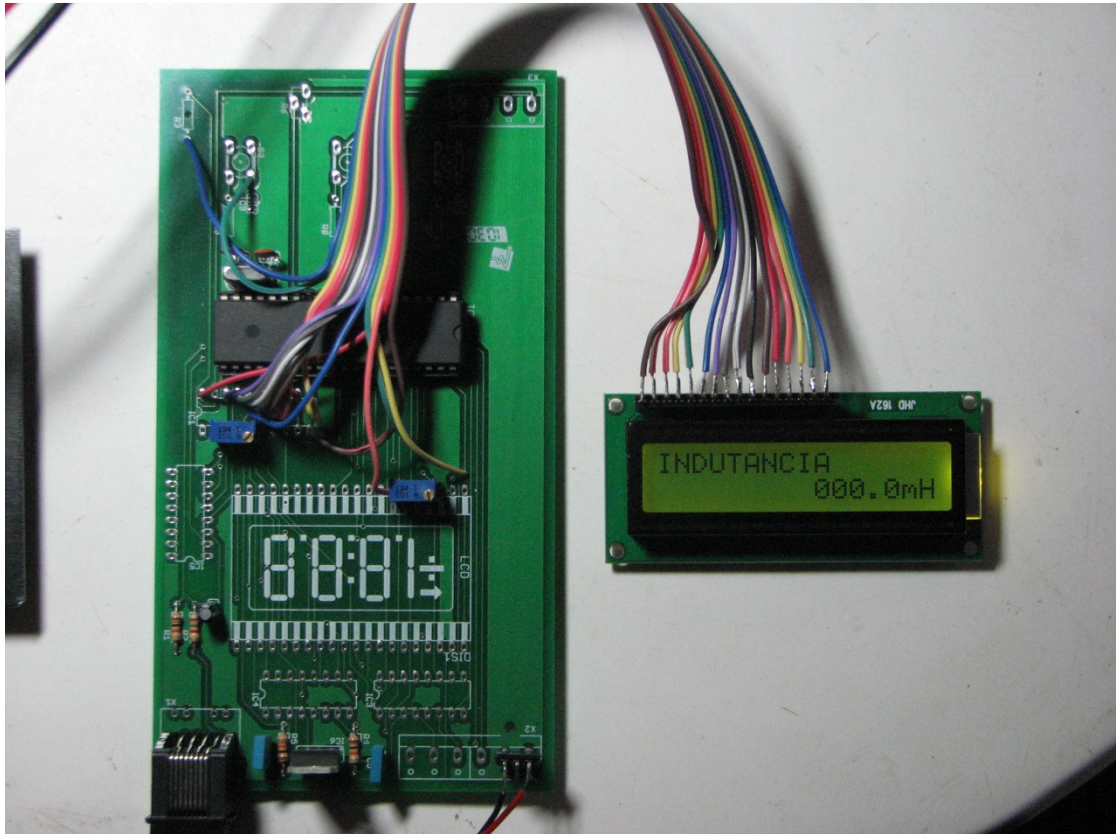


Figura 37: Montagem do Circuito Digital

6.2 TESTES DE MEDIDAS

Foram realizadas inúmeras medições com diversos valores de indutores e todas as medidas foram comparadas com um indutímetro comercial da Impac (www.impact.com.br).

Na tabela 03 está o comparativo das medições realizadas pelo Indutímetro Digital e o Indutímetro Comercial da Impac.

Nas figuras 38 estão apresentados os indutores utilizados nas medições. Os indutores A e B utilizam o núcleo de ferrite em comum, assim como ocorre com os indutores C e D, E e F e G e H. O Indutor I está em um encapsulamento (Figura 39). O indutor J é variável (Figura 40).

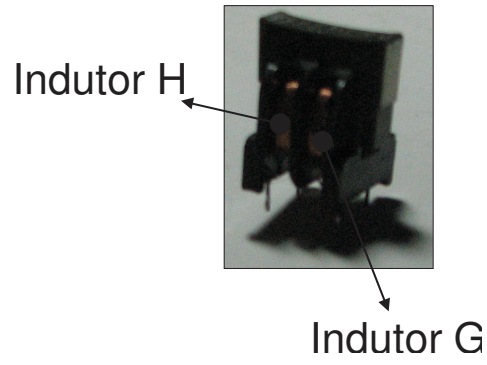
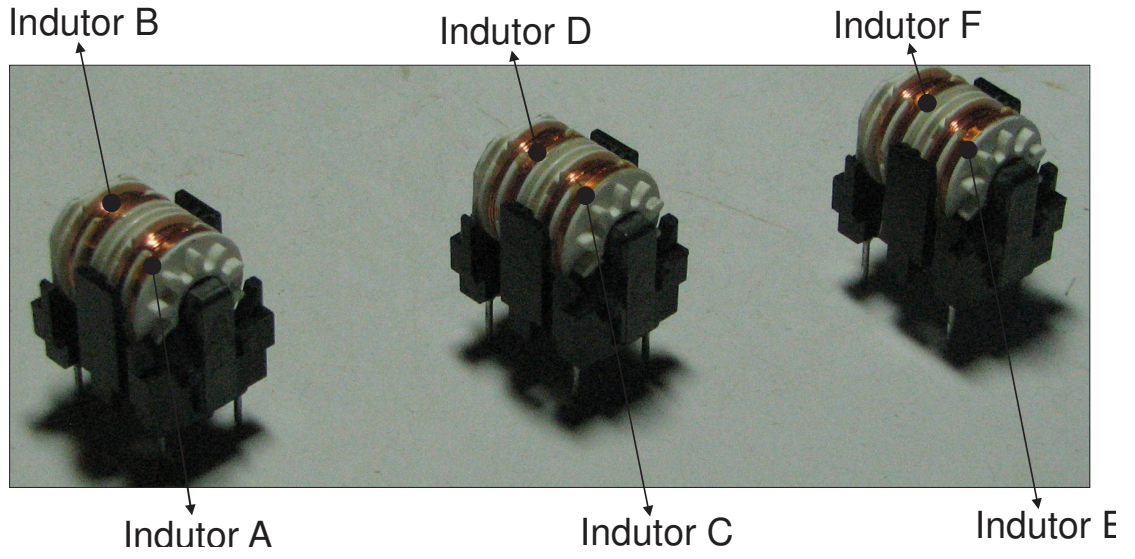


Figura 38: Indutores de testes



Figura 39: Indutor de Teste

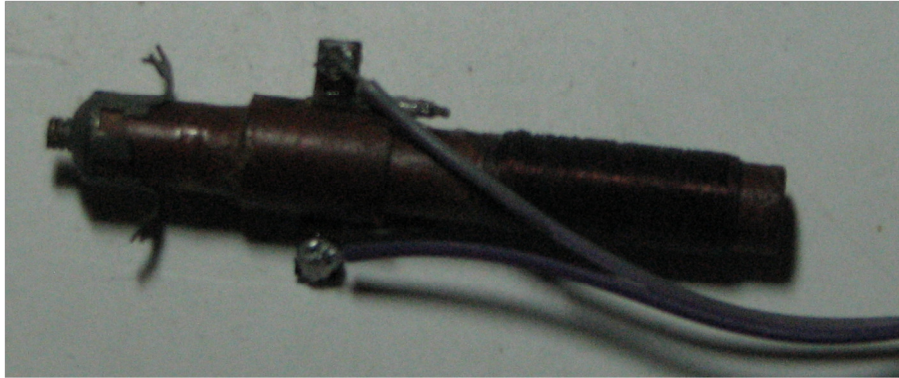


Figura 40: Indutor de Teste Variável

Indutor	Indutímetro Digital	Indutímetro Impac
A	23,0mH	23,4 mH
B	23,0 mH	23,4 mH
C	22,0 mH	22,7 mH
D	22,0 mH	22,7 mH
E	24,2 mH	23,8 mH
F	24,2 mH	23,8 mH
G	24,2 mH	22,3 mH
H	24,2 mH	22,3 mH
I	0,8 mH	1,2 mH
Jmin	3,3 mH	3,3 mH
Jmax	22,6 mH	21,3 mH
Jintermediário	15,1 mH	15,2 mH
A+C	48,0 mH	46,3 mH
A+B	98,2 mH	100,2 mH
A+B+C	121,4 mH	122,9 mH
A+B+C+D	195,3 mH	190,1 mH
A+B+C+D+E	219,6 mH	212 mH
A+B+C+D+E+F	317,2 mH	285 mH

Tabela 04: Comparativo de Medições

7 CONCLUSÃO

Avaliando o projeto desenvolvido, conclui-se que os principais objetivos foram alcançados mesmo com toda a dificuldade que foi surgindo durante o seu desenvolvimento.

O método escolhido é capaz de realizar a função de medir indutâncias, e com certeza, pode ser aperfeiçoado para quem sabe se tornar um produto comercializável.

A escolha do circuito da figura 05 foi, com certeza, o passo mais importante no decorrer dos trabalhos, e apesar de que um circuito oscilador LC é um circuito simples de implementar, ele se mostrou extremamente complexo de analisar teoricamente.

O microcontrolador realizou satisfatoriamente as funções necessárias, porem outro componente equivalente, mas com mais recursos, poderia facilitar o trabalho e melhorar a precisão de alguns cálculos.

No contexto geral o desenvolvimento dos trabalhos foi muito proveitoso para a ampliação dos conhecimentos e para a demonstração de que a partir de uma simples ideia é perfeitamente possível chegar a um produto final.

8 BIBLIOGRAFIA

- Study of DC Transient In RLC Circuits, version 2 EE IIT, Kharagour
- Exercícios Resolvidos Departamento de Análise IME/UERJ, Augusto Cesar de Castro Barbosa
- Cabo Programação AT89S52 – Centro Tecnológico Parobé –Curso de Eletrônica, Prof. Paulo Flores
- Using HD44780 based LCDs – JHD162A, Suhas’s Blog
- Microcontrolador 8051 Detalhado, Denys E. C. Nicolosi, Ed. Érica
- Data Sheet AT89S52 – Atmel
- Data Sheet LM331 – National Semiconductors
- Data Sheet HEF4093B – Philips Semiconductors
- Data Sheet JHD162A Series
- Site Instituto Newton C. Braga – www.newtoncbraga.com.br