



## O AMPLIFICADOR LOCK-IN

AUTORES:

MARCELO PORTES DE ALBUQUERQUE

LEONARDO CORREIA RESENDE

JORGE LUÍS GONZALEZ

RAFAEL ASTUTO AROUCHE NUNES

MAURÍCIO BOCHNER

FEVEREIRO 2008

## SUMÁRIO

RESUMO.....	3
1. INTRODUÇÃO.....	4
2. O QUE É UM AMPLIFICADOR LOCK-IN.....	5
3. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS.....	6
4. O KIT EP2S60 STRATIX II.....	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13

## RESUMO

Esta nota técnica tem por objetivo a apresentação de um Amplificador Lock-In no KIT DSP da empresa Altera, modelo EP2S60 e a linguagem de programação do Matlab. O Lock-In utiliza conversores analógico digital de elevada taxa de amostragem permitindo a realização de medidas com sinais de referência na faixa de 500KHz até 4MHz.

## 1. INTRODUÇÃO

Os sinais estão presentes em nosso cotidiano. Ter o domínio sobre técnicas de processamento e análise de sinais é de elevada importância para resolução de vários problemas na área de física experimental.

O Processamento de Sinais consiste na análise e/ou modificação de sinais de forma a extrair informações dos mesmos e/ou torná-los mais apropriados para alguma aplicação específica. A área de processamento de sinais trabalha essencialmente com modelagem matemática que serve como ferramenta poderosa para a compreensão e construção de instrumentos que são de grande valia para a verificação e detecção de fenômenos físicos. O processamento de sinais de baixa amplitude é muito importante quando se deseja fazer análises de propriedades elétricas e magnéticas de materiais.

Um instrumento de grande importância para fazer tais medidas nos laboratórios de física do CBPF [1] é o Amplificador Lock-In, pois ele detecta sinais na presença de ruído e faz análise de magnitude e fase.

## 2. O QUE É UM AMPLIFICADOR LOCK-IN

O Amplificador Lock-In é um instrumento de dupla potencialidade. Ele pode detectar sinais na presença de ruídos e também é eficiente para fazer medidas de alta resolução de sinais relativamente limpos em diversas ordens de magnitude e frequência. Atualmente um Amplificador Lock-In desempenha mais funções tais como: instrumento medidor de fase, uma unidade medidora de ruído, um analisador de espectro entre outras funções. Particularmente nos laboratórios de física, o Lock-In é um dos instrumentos mais valiosos e úteis já que o mesmo faz parte de diferentes sistemas experimentais os quais permitem identificar transições de fases em sólidos cristalinos e outros sistemas físicos. Especificamente, o Lock-In permite separar e estudar sinais em fase e quadratura em diferentes experimentos, fornecendo valiosas informações sobre diferentes grandezas físicas as quais estão associadas com as componentes (fase e quadratura) dos sinais medidos.

O funcionamento do Amplificador Lock-In está baseado no seguinte princípio: um sinal AC é injetado na entrada do conversor AD9433 e na saída do conversor DAC933 obtém-se um sinal DC proporcional ao valor da entrada. O sinal passa por um detector sensível de fase (PSD) que realiza a retificação e a conversão AC/DC. O PSD é chamado de coração do Lock-In, pois todas as operações realizam-se dentro dele.

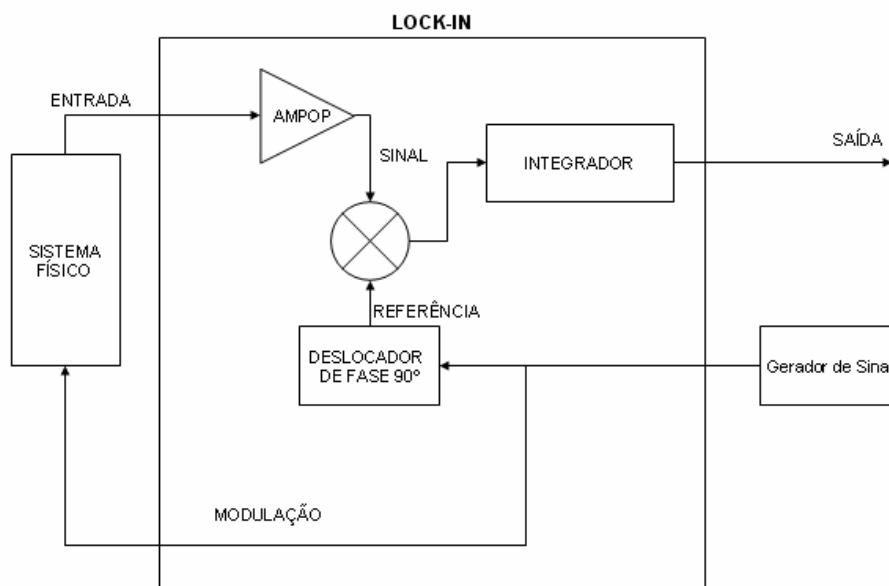


Figura 1 – Sistema Físico e sua Conexão com o Lock-In

### 3. FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS

Para o entendimento do funcionamento do Lock-In é necessária uma fundamentação matemática para a compreensão das operações que esse realiza. Esse instrumento está dividido nas seguintes partes:

- 1) Entradas do sinal medido e do sinal de referência;
- 2) PSD;

O Lock-In possui duas entradas, uma chamada de referência que pode ser gerada pelo próprio sistema ou recebe uma referência externa e uma entrada que é usada para injetar o sinal que deverá ser analisado. A figura abaixo mostra a estrutura básica de um Lock-In [2]:

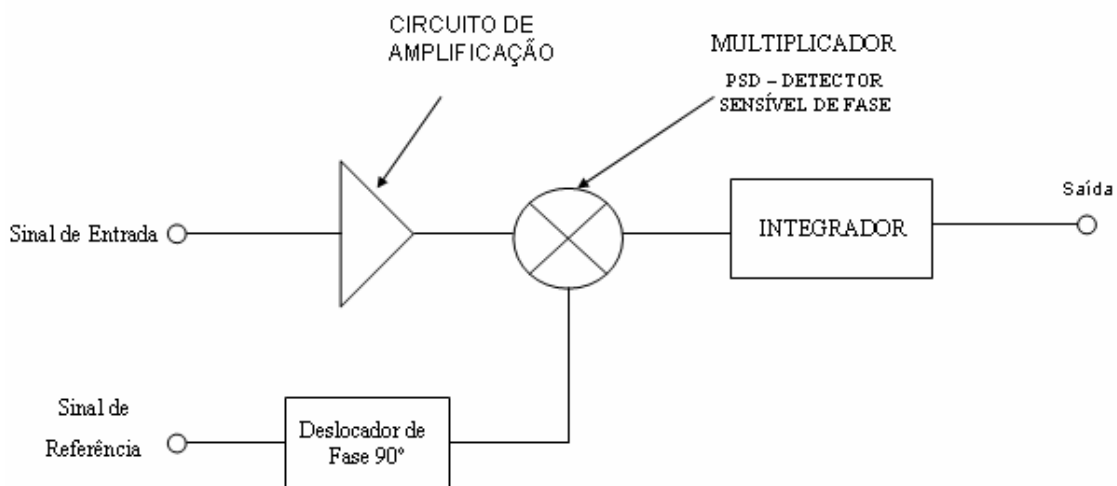


Figura 2 - Diagrama Simplificado de um Lock-In

Supomos que um sinal  $V_{in} = A \cos(\omega t)$  é detectado na entrada do Lock-In. O sinal  $V_{ref} = B \cos(\omega t + \theta)$  é gerado internamente pelo Lock-In (ou fornecido externamente) com a mesma frequência ( $\omega = 2\pi f$ ) e com uma defasagem  $\theta$ . O processo de detecção consiste em multiplicar os dois sinais:

$$\begin{aligned}
 V_{psd} &= A \cos(\omega t) \cdot B \cos(\omega t + \theta) \\
 &= A \cdot B \cdot \cos(\omega t) \cdot (\cos(\omega t) \cdot \cos \theta - \sin(\omega t) \cdot \sin \theta) \\
 &= A \cdot B \cdot (\cos^2(\omega t) \cdot \cos \theta - \cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin \theta) \\
 \cos^2(\omega t) &= (\cos(2\omega t) + 1) / 2 \\
 \cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t) &= \sin(2\omega t) / 2
 \end{aligned}$$

substituindo :

$$\begin{aligned}
 &= A \cdot B \cdot ((1/2 + (1/2) \cdot \cos(2\omega t)) \cdot \cos \theta - (1/2) \cdot \sin(2\omega t) \cdot \sin \theta) \\
 &= (1/2) \cdot A \cdot B \cdot ((1 + \cos(2\omega t)) \cdot \cos \theta - \sin(2\omega t) \cdot \sin \theta) \\
 &= (1/2) \cdot A \cdot B \cdot (\cos \theta + \cos \theta \cdot \cos(2\omega t) - \sin(2\omega t) \cdot \sin \theta) \\
 &= (1/2) \cdot A \cdot B \cdot \cos \theta + (1/2) \cdot A \cdot B \cdot (\cos \theta \cdot \cos(2\omega t) - \sin(2\omega t) \cdot \sin \theta) \\
 \cos \theta \cdot \cos(2\omega t) - \sin(2\omega t) \cdot \sin \theta &= \cos(2\omega t + \theta)
 \end{aligned}$$

substituindo :

$$= (1/2) \cdot A \cdot B \cdot \cos \theta + (1/2) \cdot A \cdot B \cdot \cos(2\omega t + \theta)$$

O resultado obtido na saída mostra que há dependência da fase da referência e também mostra que a frequência foi multiplicada por dois. Abaixo temos um diagrama que mostra o Lock-In e suas operações de maneira mais abrangente. Ele se assemelha ao programa gerado no Simulink:

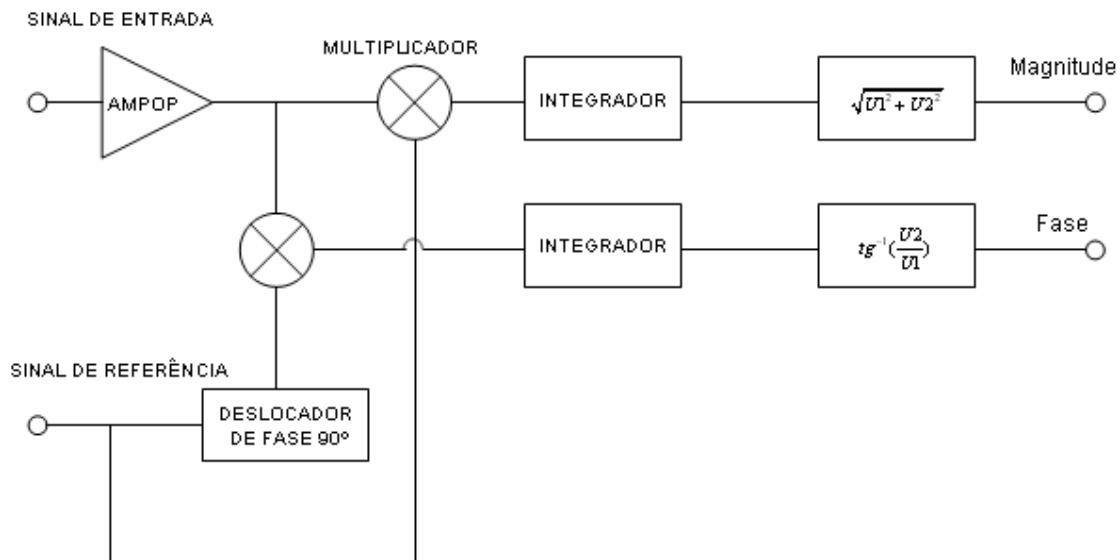


Figura 3 – Diagrama de um Amplificador Lock-In

Dentro do multiplicador ocorre a detecção síncrona e a correlação entre os sinais e não somente uma multiplicação entre eles. O que acontece é uma modulação do sinal e uma

amplificação sintonizada na frequência de operação, que é o princípio da detecção síncrona. A correlação entre dois sinais consiste na soma dos componentes de um sinal com o outro defasado de um valor qualquer. A operação de correlação que ocorre dentro do PSD trata de dois sinais que são definidos como funções matemáticas para a análise. Funções de correlação são funções matemáticas que determinam o grau de interdependência entre duas funções de mesma natureza. Detecção síncrona é um tipo de medida da física e da engenharia, em que se produz uma perturbação em um determinado sinal para confirmá-la em outro sinal, o que pode estabelecer alguma relação entre ambos.

São empregadas com a finalidade de comparar estas duas funções e determinar onde elas apresentam comportamento mais semelhante. O processo matemático de correlação que ocorre no PSD é descrito abaixo:

$$(1) \quad R(\delta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot g(t + \delta) dt$$

$$(2) \quad R(\delta, T) = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot g(t + \delta) dt$$

$$f(t) = a \cdot \sin(\omega t) \quad g(t) = b \cdot \sin(\omega t + \Delta)$$

$$(3) \quad R1(\Delta) = \frac{a \cdot b}{n \cdot T} \int_0^T \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \Delta) dt$$

$$\sin(\omega t + \Delta) = \sin(\omega t) \cdot \cos \Delta + \sin \Delta \cdot \cos(\omega t)$$

$$\int_0^T \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \Delta) = \int_0^T \sin^2 \omega t \cdot \cos \Delta dt + \int_0^T \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin \Delta dt$$

**Resolvendo-se a integral obtém-se:**

$$(4) \quad R1(\Delta 1) = U1 = \frac{a \cdot b}{2} \cdot \cos(\Delta 1)$$

$$(5) \quad R2(\Delta 2) = \frac{a \cdot b}{n \cdot T} \int_0^{nT} \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \Delta 2) dt$$



$$R2(\Delta 2) = \frac{a.b}{nT} \int_0^{nT} \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \Delta 1 \pm \pi/2) dt$$

$$(6) \quad R2(\Delta 1) = U2 = \pm \frac{a.b}{2} \cdot \sin \Delta 1$$

$$(7) \quad U_{out} = \sqrt{U1^2 + U2^2} = \sqrt{(a.b/2)^2 \cdot [\cos^2(\Delta) + \sin^2(\Delta)]}$$

$$= (a/\sqrt{2}) \cdot (b/\sqrt{2}) = \text{arms.brms}$$

$$(8) \quad \tan(\Delta) = \frac{\sin \Delta}{\cos \Delta} = \frac{U2}{U1} \quad \Delta = \tan^{-1}\left(\frac{U2}{U1}\right)$$

Na resolução matemática temos que  $f(t)$  é o sinal de entrada e  $g(t)$  é o sinal de referência. Em (1) e (2) temos a fórmula da função de correlação, em (3) temos a aplicação para a situação descrita acima com o sinal de referência defasado em  $\Delta_1$  em (4) temos o resultado da integração. (5) nos mostra a mesma situação de (4), porém com uma defasagem  $\Delta_2$  que seria  $\Delta_1 \pm 90^\circ$  dando um resultado em (6) dependente do seno enquanto (5) depende de co-seno. Pode-se perceber que tanto  $U_1$  quanto  $U_2$  são dependentes das amplitudes dos respectivos sinais e também da fase. Todos esses valores são constantes definindo o que foi mencionado anteriormente de que o resultado da magnitude é um valor constante dependente das magnitudes. Em (7) e (8) temos o resultado que determina os valores de magnitude e fase do Amplificador Lock-In.

#### 4. O KIT EP2S60 STRATIX II

O kit EP2S60[3] foi o escolhido após várias pesquisas sobre o DSP que melhor atenderia o projeto. A placa de desenvolvimento escolhida tem como características uma plataforma de desenvolvimento de alto desempenho em processamento de sinais digitais baseados no dispositivo Stratix II. Combina com DSP Intellectual Property [4] (Datasheet Altera) da empresa Altera que tem várias megafunções que auxiliam no desenvolvimento de sistemas de alta velocidade. O objetivo deste trabalho é projetar e construir um Amplificador Lock-In que seja capaz de analisar sinais na faixa de frequência de 500KHz até 4MHz.

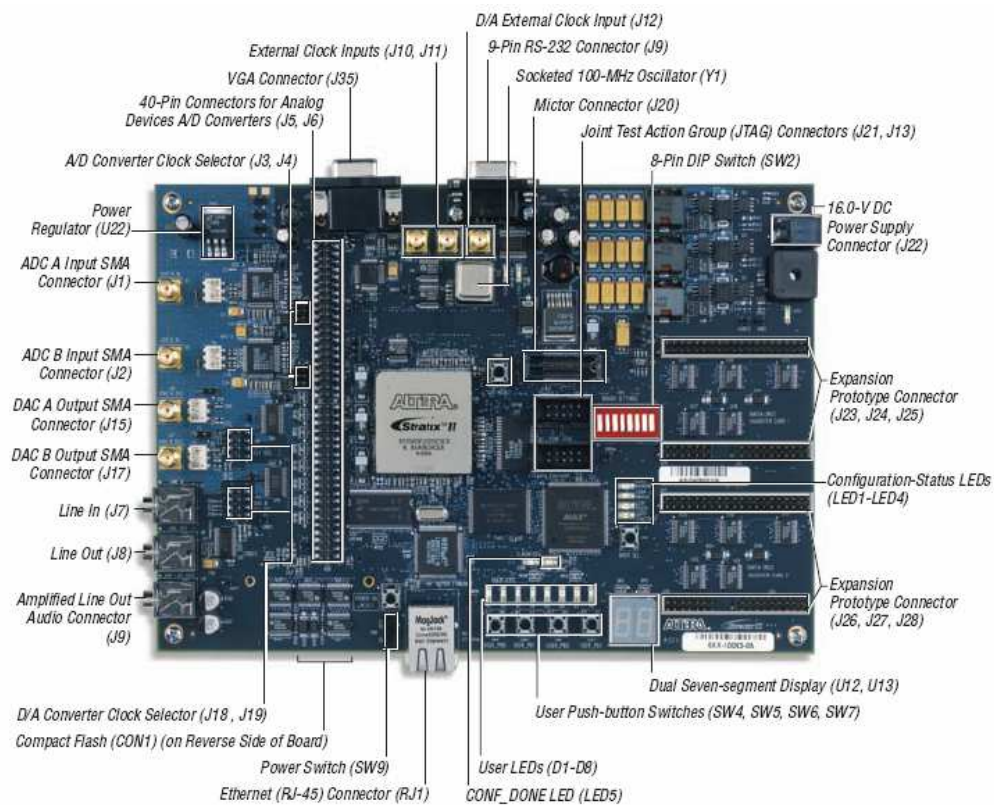


Figura 4 – O kit EP2S60

Depois de construído e configurado com os parâmetros devidos o Amplificador Lock-In foi submetido a uma primeira medição. O objetivo era avaliar se o sistema estava trabalhando de forma coerente com o esperado. Antes de injetar o sinal no sistema faz-se uma medida de tensão e uma avaliação que o mesmo sinal é injetado na entrada A2D\_1(Sinal Analisado) e na entrada A2D\_2(Sinal de Referência). Usa-se para este teste um sintetizador que proporciona uma variação de frequência de zero até 1GHz. O

sinhal injetado tem frequência de 1MHz e amplitude de 400mVpp. Após a inserção do sinal nas duas entradas acima se faz a compilação e carrega-se o programa na FPGA do kit EP2S60. No gráfico abaixo se vê os sinais analisados no SignalTap Analysis:

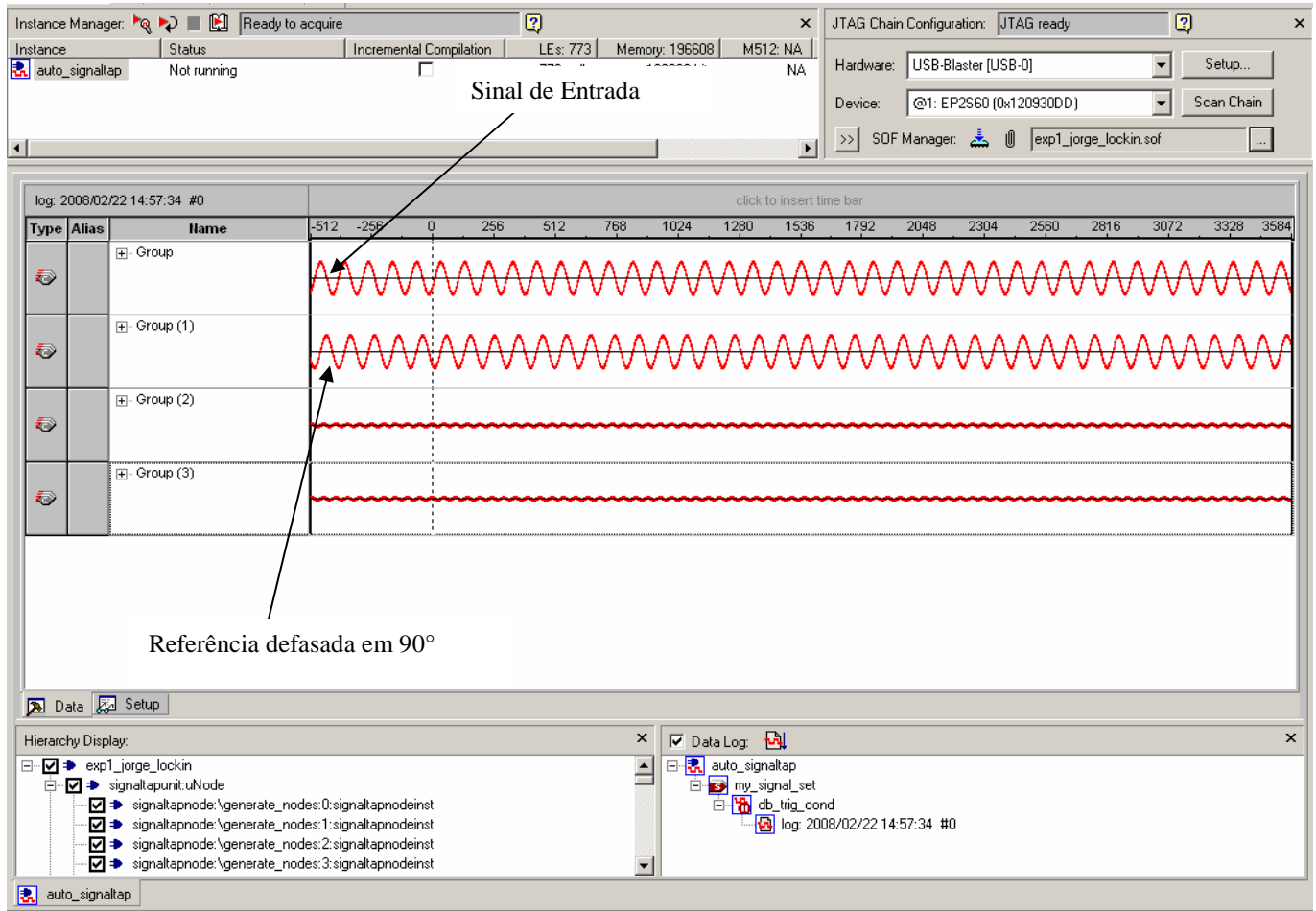


Figura 5 – Sinais lidos pelos nodes colocados após o conversor AD9433

Para efeito de análise e comparação os sinais foram capturados do osciloscópio através do programa WaveStar for Oscilloscopes [4] e mostrados na figura abaixo:

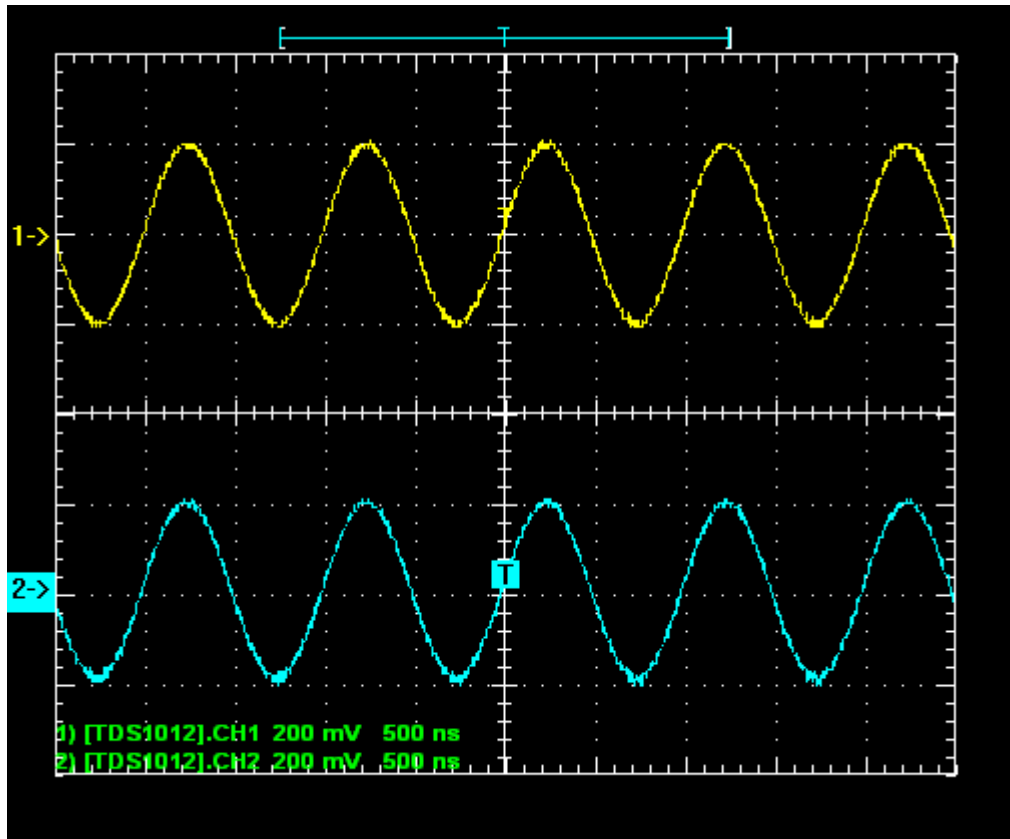


Figura 6 – Sinais de Entrada e de Referência lidos no osciloscópio

Pela escala do osciloscópio cada divisão tem 200mV e ambos estão em fase, logo com uma defasagem de  $0^\circ$ . A função do Amplificador Lock-In será medir a amplitude dos sinais de entrada e medir a magnitude e a fase dos sinais comprovando que os sinais estão em fase e que a magnitude é o produto entre os dois sinais.

Após a leitura e feitas as devidas conversões para milivolts temos uma medida de tensão de 399,48 mVpp. Esse valor medido foi adquirido através da taxa de amostragem feita pelo Lock-In. A seguir fazem-se as operações para a determinação de magnitude e fase do sinal de entrada. A tabela abaixo mostra o resultado de seis medições para a validação do sistema.

Fase	Magnitude
0,063789	19655,04057
0,1146681	19821,44452
-0,059293	20024,45526
0,03645	19573,45
-0,127899	20313,63148
-0,185557	20342,7475
Média fase	Média magnitude
-0,026307	19955,12822

$V_{in}$	400mVpp
Fase osciloscópio	$0^\circ$
Magnitude calculada	19948,03
$V_{in}$ Lock-In	399,48

Tabela 1 – Resultados das medidas feitas pelo Amplificador Lock-In

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

[www.cbpf.br](http://www.cbpf.br)

[2] SIGNAL RECOVERY, [http://www.signalrecovery.com/\\_AppsNotes/tn1000.pdf](http://www.signalrecovery.com/_AppsNotes/tn1000.pdf),

[http://www.signalrecovery.com/\\_AppsNotes/tn1001.pdf](http://www.signalrecovery.com/_AppsNotes/tn1001.pdf),

[3] STRATIX II EP2S60 DSP Development Board,

[http://www.altera.com/literature/ds/ds\\_stratixII\\_dsp\\_dev\\_board.pdf](http://www.altera.com/literature/ds/ds_stratixII_dsp_dev_board.pdf)

[4] [http://www.tek.com/site/ps/0,,60-12123-INTRO\\_EN,00.html](http://www.tek.com/site/ps/0,,60-12123-INTRO_EN,00.html)