

Amperímetro Logarítmico

Pesquisadores responsáveis

Dr. Santiago J.A. Figueroa, coordenador da linha de XAFS2 (santiago.figueroa@lnls.br)
Dr. Douglas Galante, coordenador da linha de TGM (douglas.galante@lnls.br)
MSc. William Roberto Araújo, Analista Tecnológico do DET (william.araujo@lnls.br)

Unidade do CNPEM

Laboratório Nacional de Luz Síncrotron

Resumo

Muitas medidas nas linhas de luz usam um tipo de amperímetro para medir a corrente. O presente projeto tem o propósito de desenvolver um amperímetro de base logarítmica, que pode variar um intervalo de 200 dB sem qualquer tipo de alteração de escala. Este documento descreve o desenvolvimento de um amperímetro de base logarítmica. Em primeiro lugar, é introduzida uma breve descrição das vantagens do uso deste amperímetro e as possíveis aplicações. Este amperímetro é baseado nas propriedades do amplificador logarítmico (LogAmp).

A segunda parte deste documento descreve o desenvolvimento teórico do LogAmp e como ele será usado como um amperímetro de precisão. Um protótipo do amperímetro foi projetado e testado em 2016. Os resultados dos testes de viabilidade são apresentados na seção 2 deste documento. Existe uma caracterização do módulo LogAmp em uso na linha TGM como um eletrômetro. Nesta mesma seção é descrito como o produto final será feito. A seção 3 tem alguns objetivos possíveis a serem realizados para validar o amperímetro, e a seção 4 contém um cronograma tentativo que expressa a metodologia a seguir nos prazos impostos para conseguir ter um prototipo final testado e validado.

1. Introdução

1.1. Motivação

A medição da corrente elétrica é uma parte importante das experiências nas linhas de luz. Hoje em dia, essas medidas atuais são realizadas por instrumentos comerciais como os pico-amperímetros Keithley, Stanford e Agilent. Um problema que este tipo de amperímetros é o tempo necessário para mudanças na escala de medição, que às vezes é muito lento para algumas medições realizadas nas linhas de luz. Esta limitação leva a longas varreduras de energia, normalmente provoca erros que podem produzir dados inutilizáveis devido à mudança de alcance e, às vezes, mesmo impedindo que alguns tipos de medições sejam realizados. Isso é especialmente problemático quando grandes faixas de energia ou escalas espaciais são digitalizadas, ou nos casos de medidas onde a velocidade de aquisição compromete as mudanças de escala (flyscan). O presente projeto propõe o desenvolvimento de um pico-amperímetro baseado em um Amplificador Logarítmico (LogAmp). A saída do LogAmp deve ser convertida em um sinal digital e interpretada por um sistema de suporte (um FPGA ou um Microcontrolador) que pode converter o sinal de tensão em uma medida da corrente de entrada, totalmente compatível com os sistemas EPICS usados nas linhas de luz.

A primeira proposta consiste em um amperímetro logarítmico de alta velocidade com uma faixa de 200 dB (de 1 pA a 10 mA). Isto conterà dois canais de entrada que podem operar individualmente ou gerar uma saída logarítmica da razão das entradas. Este projeto é proposto para ser desenvolvido pelo Grupo de Detectores (DET) em colaboração com as linhas XAFS2 e TGM. Podendo eventualmente estender-se a outras linhas de luz que usam as técnicas de absorção de raios X (XRF, XAFS1, XDS, SXS, PGM, etc).

1.2. Aplicação

Um amperímetro com ampla faixa de operação pode ser muito útil para muitos experimentos e sistemas de controle no LNLS.

Alguns exemplos:

- Sensores como fotodiodos, malhas de ouro, câmaras de ionização, fotomultiplicadores de silício e outros podem ser usados para medição de varreduras de energia, varreduras de motor e alinhamento nas diferentes linhas de luz comentadas neste projeto;
- Devido à resposta rápida e ao alto alcance dinâmico, o amperímetro pode ser uma ferramenta ideal para monitoramento e diagnóstico de feixes em tempo real (para fótons e elétrons);
- Fly-Scan para varredura de energia contínua para diminuição do tempo morto entre as medições;
- Medições de absorção baseadas em hardware com câmaras de ionização, utilizando a comparação interna de sinais entre câmaras. Isso pode ser implementado em muitas linhas de luz executando experimentos XAS, e já atraiu o interesse da equipe das linhas PGM e SXS.

1.3. Desenvolvimento teórico

1.3.1. Amplificador Logarítmico (LogAmp)

Um amplificador logarítmico (LogAmp) é um dispositivo que pode expressar a saída como uma função logarítmica da entrada, seja em corrente elétrica ou tensão. O LogAmp mais comum usa a curva exponencial de um transistor de junção bipolar (BJT) para converter uma corrente de entrada

em uma tensão de saída logarítmica. O modelo mais simplificado é composto por um transistor NPN conectado no feedback negativo de um amplificador operacional, conforme mostrado na figura 1.3.1. A função de transferência deste circuito é:

$$V_{out} = -V_{BE} = V_t \cdot \ln(I_e/I_s) \sim V_t \cdot \ln(I_{in}/I_s) \quad (1)$$

Onde I_s é a corrente de saturação inversa e V_t é a tensão térmica. A primeira é uma constante dependente dos parâmetros de construção, materiais e, como consequência, temperatura de operação. A tensão térmica é um parâmetro universal de transístores, e depende apenas da temperatura. A aproximação mostrada acima pode ser usada devido ao fato de que a corrente de entrada no LogAmp é aproximadamente zero.

Uma primeira solução para reduzir a dependência da temperatura é a introdução de um segundo Operational Amplifier (OpAmp), que actua como uma referência ao primeiro através de um circuito de subtração, como mostrado na figura 1.

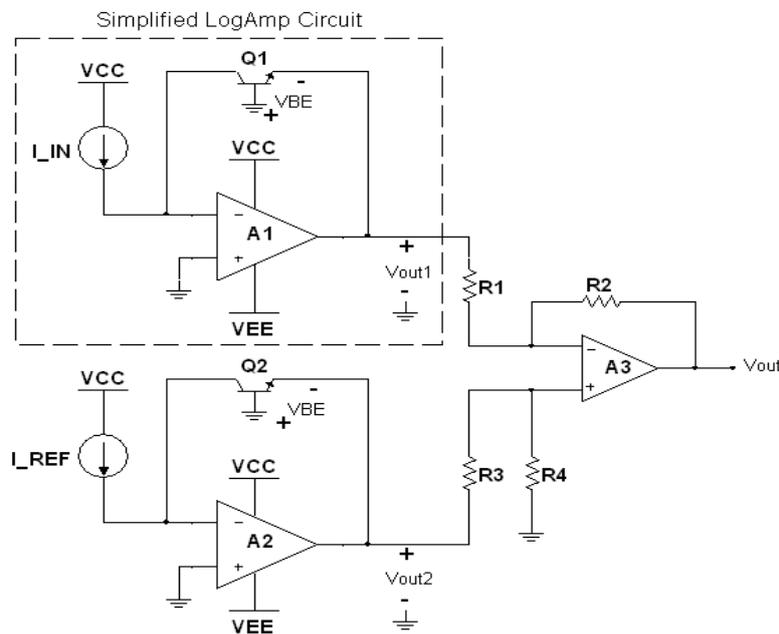


Figura 1.1 - Um logAmp atual referenciado é mostrado acima. Um modelo simplificado de um circuito LogAmp é delineado. A subtração da saída de dois LogAmps simples com o terceiro OpAmp (A3) elimina a dependência de temperatura gerada por I_s .

A função de transferência geral do circuito acima é dada por:

$$V_{out} = V_y' \cdot \ln(I_{in}/I_s) - V_y' \cdot \ln(I_{ref}/I_s) = V_y \cdot \log(I_{in}/I_z) \quad (2)$$

Onde V_y é uma função de V_t eo ganho atribuído do resistor no circuito subtrator, e I_z é um nome de conversão para I_{ref} . Esta abordagem é capaz de eliminar a dependência da temperatura causada por I_s porque os transístores têm propriedades quase idênticas e estão em contato térmico próximo para cancelamento adequado. No entanto, V_y é proporcional a V_t , e assim, é ainda sensível a variações de temperatura. Adicionando circuitos de compensação de temperatura subsequentes esta dependência é praticamente eliminada (normalmente, um estágio de amplificador OpAmp adicional com um detector de temperatura resistiva [RTD], ou dispositivo semelhante, é incorporado como parte do ganho). Vários circuitos integrados comerciais incorporaram algum tipo de compensação de temperatura que pode estabilizar o ganho final V_y do sistema. Esta foi a solução de escolha inicial para este projeto, que deve ser mais validada por ensaios térmicos com o protótipo.

1.3.2. Esquemas Gerais

O amperímetro logarítmico proposto deve ser um sistema capaz de medir correntes e convertê-lo em um sinal digital para se comunicar com um computador via Ethernet, sendo totalmente compatível com os sistemas EPICS atualmente em vigor no LCLS. Um esquema simplificado é mostrado na figura 1.3.2. abaixo.

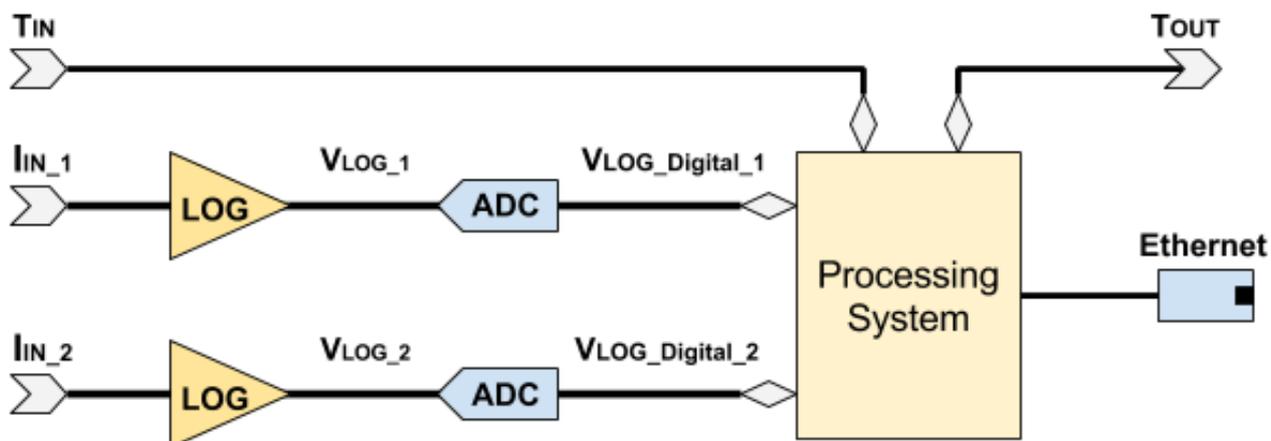


Figura 1.2 - Esquemas simplificados do amperímetro logarítmico. Existem dois canais para a medição da corrente. O sinal de corrente é convertido em uma saída de tensão logarítmica VLOG do LogAmp. Em seguida, este sinal analógico logarítmico é convertido num sinal digital pelo Conversor Analógico-Digital (ADC), que é recebido por um sistema de processamento, que pode fazer a manipulação de dados necessária para interpretar a corrente medida. Os dados são enviados por uma comunicação Ethernet para o computador terminal.

Em princípio, o Amperímetro Logarítmico foi projetado para ser um sistema independente. As correntes de entrada podem ser processadas pelo amperímetro logarítmico e o valor medido é transmitido através do protocolo Ethernet para um computador terminal. O sistema de processamento deve ser capaz de ler dois sinais simultâneos com e um sistema de disparo adicional para sincronismo na aquisição. Permitirá também que a aritmética requerida gere um valor logarítmico da razão das entradas 1 e 2, ou para quaisquer operações desejadas.

Os esquemas apresentados acima são a estrutura mais simplificada para o amperímetro logarítmico, e isso pode ser incorporado em uma variedade de outras configurações. Por exemplo, este sistema pode ser incorporado combinado a uma fonte de alimentação de alta tensão, construindo um controlador de tensão da câmara de ionização, que poderia ser de aplicação direta a muitas linhas de luz que medem a absorção de raios X (XAS). Os detalhes técnicos sobre os esquemas são discutidos na seção 2 deste documento.

2. Estado da Arte

2.1. LogAmp

Para desenvolver o amperímetro logarítmico, um circuito integrado comercial (IC), o ADL5304, será usado como um LogAmp. Já foi desenvolvido um protótipo do módulo LogAmp do ADL5304, e os testes foram realizados com sucesso na linha TGM pelo estagiário Marcos Roberto Bissano Errada. Este protótipo e os testes foram utilizados para comprovar a viabilidade do uso do LogAmp como um amperímetro. Os testes foram apresentados na XI edição do PCaPAC, realizada em Campinas e hospedado no LNLS e foi publicado no site do congresso.

Pré-lançamento: <http://vrws.de/pcapac2016/papers/thpoprpo05.pdf>

2.1.1 ADL5304

O ADL5304 é um Conversor Logarítmico de Analog Devices com uma corrente de entrada de 200 dB (correntes de 1 pA a 10 mA), com resposta rápida. É termicamente estável para temperaturas entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Modificando V_y e I_z parâmetros, ele pode ser configurado para acomodar até 13 diferentes opções de escala. Para o primeiro teste, utilizou-se um sistema dual no qual os valores dos parâmetros foram, obtido a partir da folha de dados, $V_y = 0,2\text{ dB / dec}$ e $I_z = 100\text{ nA}$. A faixa de tensão de saída foi assim ajustada de -1 V para 1 V aproximadamente.

O primeiro protótipo foi construído e testado na linha TGM com sucesso. Muitos testes foram realizados, mas os principais foram a determinação dos parâmetros V_y e I_z , e as medições de saída de diferentes detetores na linha de luz. Os testes foram feitos usando a configuração experimental abaixo:

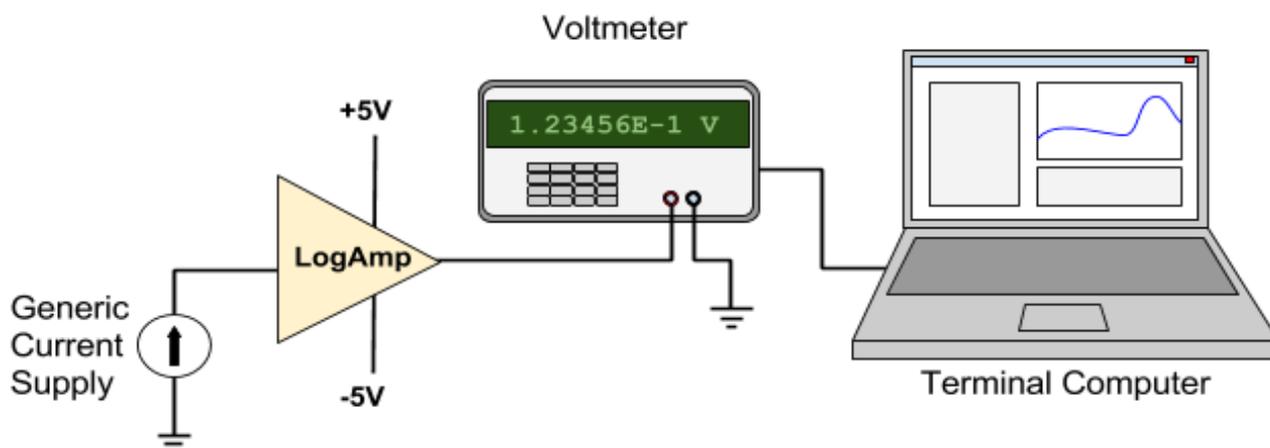


Figura 2.1 - Esquema da configuração experimental para testes LogAmp. Todas as experiências foram desenvolvidas nesta configuração. A comunicação entre o Terminal Computer e o Voltímetro é feita pelos COI do sistema EPICS. A fonte de corrente genérica (GCS) pode ser qualquer dispositivo; Uma fonte comercial, um fotodiodo ou uma fonte de alimentação de tensão em série com resistências de saída.

Para a determinação dos parâmetros de dimensionamento, utilizou-se uma fonte de corrente da Keithley, modelo K6430, como GCS. O valor de entrada da corrente foi variado e os valores da tensão de saída foram computados. A curva linearizada I-vs.-V de LogAmp é mostrada na figura 2.2.

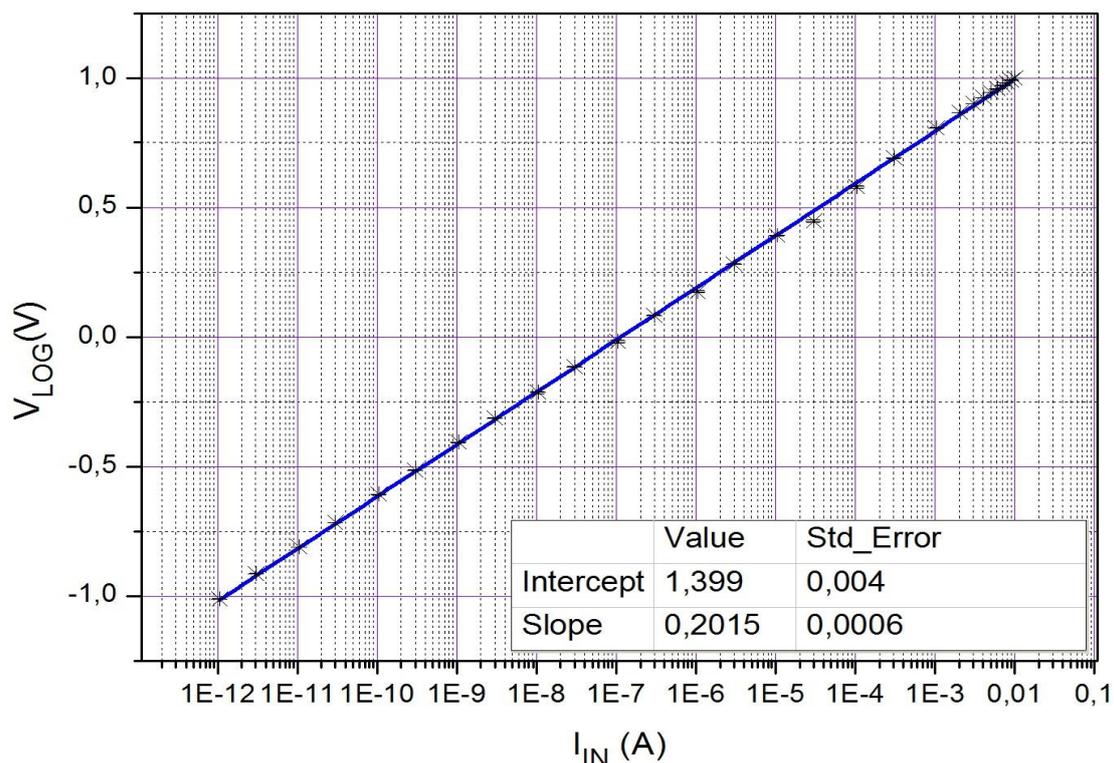


Figura 2.2 - Relação IIN-to-VLOG do LogAmp. O valor da inclinação corresponde ao parâmetro V_y , e a partir de uma manipulação da equação 2, $I_z = (115 \pm 8)$ nA.

Os testes seguintes foram feitos fazendo uso do LogAmp para fazer medições na linha de luz TGM. Sendo este um claro exemplo de teste realizado em TEY (Total Electron Yield) para a absorção de raios X na faixa de VUV com uma folha de alumínio, usando um amperímetro comercial e o LogAmp. Neste caso, o GCS é a folha de alumínio ligada ao dispositivo de medição. Foram coletadas 10 medidas de TEY para cada um dos instrumentos de medida. A curva média dos dois sistemas é mostrada na figura 2.3, para uma comparação do desempenho.

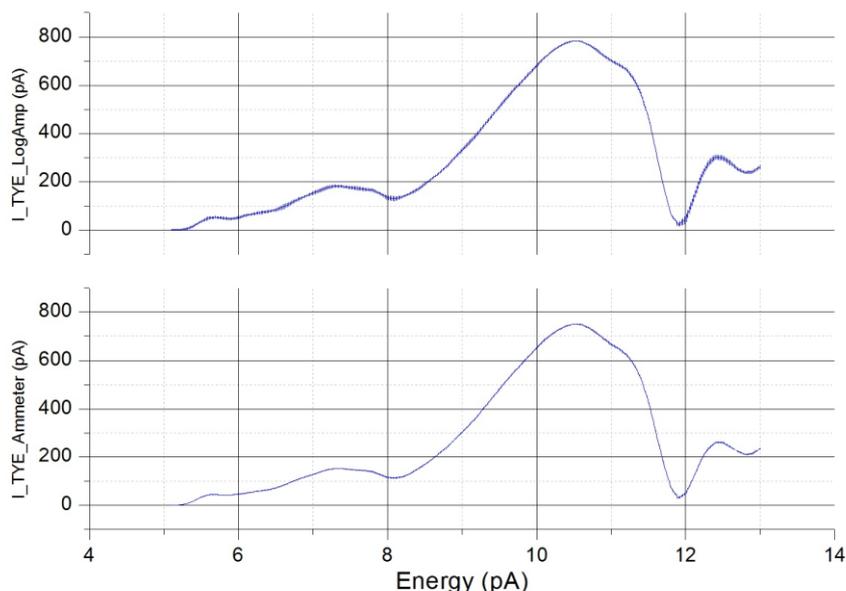


Figura 2.3 - Análises de TEY para a grade 1 (3 eV a 13 eV). Cada gráfico refere-se à curva média de um instrumento com erros padrão (as barras de erro são menores que a espessura da curva em alguns casos). A curva superior é o perfil obtido pelo uso do LogAmp, enquanto a curva baixa foi obtida com o amperímetro comercial.

2.2. ADC

O conversor ADC é um dos principais componentes para determinar a precisão do amperímetro. Se a sua resolução é, a resolução da corrente medida é dada por:

$$\sigma_I = I \cdot (10^{\frac{\sigma_V}{V_y}} - 1) \quad (3)$$

Este resultado mostra que a resolução atual varia com a corrente de entrada. No entanto, a resolução de tensão é uma constante do ADC e V_y uma constante do LogAmp. Portanto, a relação entre a resolução ADC ea corrente de entrada fornece:

$$\frac{\sigma_I}{I} = (10^{\frac{\sigma_V}{V_y}} - 1) \quad (4)$$

Que é uma "resolução relativa" da corrente medida. A resolução ADC é dada por:

$$\sigma_V = \frac{\Delta V}{2^{N-1}} \quad (5)$$

Onde N é o número de bits do ADC e ΔV é a faixa de tensão de saída. Aplicando a relação de (5) em (4), é possível determinar a resolução relativa em função do número de bits. Considerando o parâmetro $V_y = 0,2 \text{ V / década}$ e a variação de tensão de 2V, foi construído o gráfico da resolução percentual em função do número de bits, ilustrado na figura 2.4 abaixo:

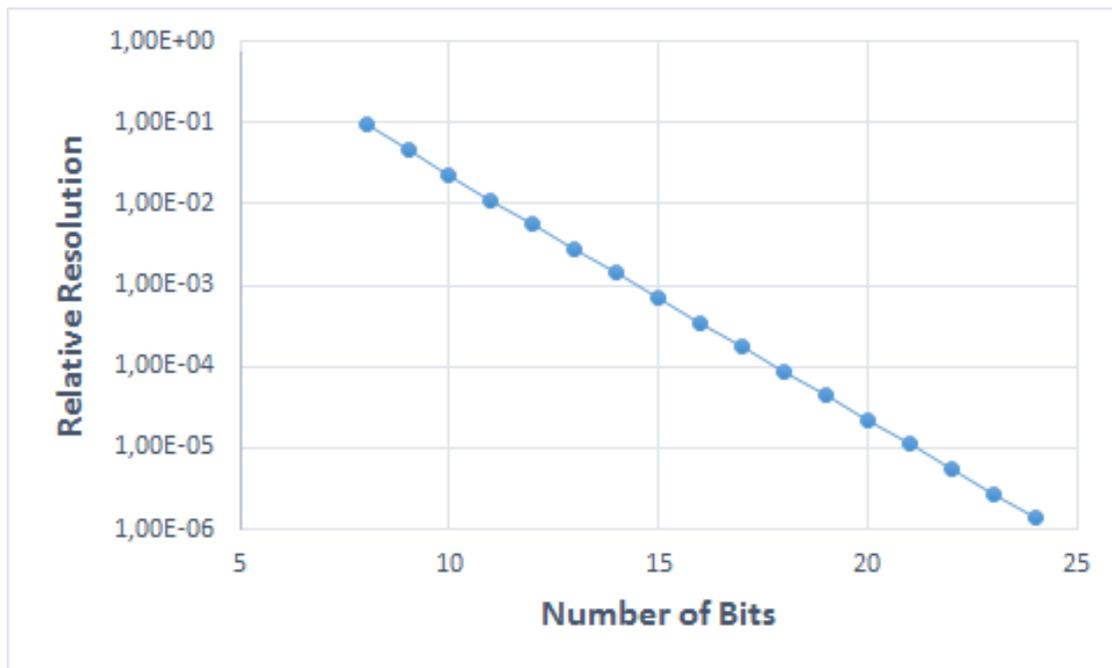


Figura 2.4 - Resolução relativa em função do número de bits. A natureza exponencial da resolução relativa tem uma curva exponencial, que é melhor mostrada como uma curva mono-log.

A partir deste gráfico, é possível determinar o número de bits que fornece a melhor resolução relativa. ADCs com um maior número de bits tendem a ser mais lento do que aqueles com menos. Portanto, existe um compromisso entre a precisão ea velocidade da conversão ADC, e é necessário encontrar um ponto ideal para o amperímetro.

2.3. Firmware, Software e Comunicação

- Firmware: Desenvolvimento de um firmware para leitura de conversores analógico-digitais, filtros digitais, trigger, monitor de temperatura interna e gerenciador de pacotes Ethernet com protocolo padrão SCPI (Comandos Padrão para Instrumentos Programáveis);
- Software: Desenvolvimento de uma interface gráfica para comunicação e controle de módulo de medição de corrente;
- Controlador EPICS: Desenvolvimento de um IOC (Input-Output Control) para leitura e controle de módulo de corrente.

3. Objetivos

Os objetivos a alcançar com este dispositivo dependem diretamente dos testes de validação que são necessários para avaliar a confiabilidade do amperímetro e compará-lo com sistemas comerciais. Alguns exemplos de testes a serem realizados são descritos a seguir:

- **Gama de entrada e resolução de entrada:** Teste a gama de correntes a que o amperímetro é capaz de medir sem perda de precisão e estabilidade desejadas;
- **Tensão de carga:** A corrente de vazamento de carga em uma medição;
- **Taxa de leitura:** o número de medidas que o amperímetro é capaz de realizar em 1 segundo ou tempos menores (milissegundos).
- **Largura de banda:** Os testes de resposta em frequência serão realizados por pequenos testes de sinal na entrada do amperímetro;
- **Estabilidade de temperatura:** Todos os testes devem ser realizados em diferentes temperaturas de operação.

