

Caracterização de ADCs $\Sigma\Delta$: Arquitetura, Métricas e Procedimentos de Medição

Rafael Oliveira Nunes (CTI)
rafael.nunes@cti.gov.br

Resumo

Este artigo apresenta um roteiro padronizado para a caracterização de conversores sigma-delta ($\Sigma\Delta$), cobrindo sinais de controle e sincronismo de leitura, métricas estáticas e dinâmicas, e procedimentos de medição em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). São definidos e aplicados SNR, ENOB, THD, SFDR, SINAD, INL/DNL, PSRR/CMRR, jitter e latência, com ênfase em amostragem coerente e no limite prático imposto pelo jitter do relógio. As recomendações priorizam coerência de aquisição, rastreabilidade e comparabilidade de resultados, estabelecendo um procedimento reprodutível para medição e para decisões de projeto sob restrições de potência e latência.

Palavras-chave: ADC sigma-delta; caracterização experimental.

1 Introdução

A caracterização de conversores analógico-digitais para uso espacial exige alinhamento entre arquitetura, métricas e instrumentação, garantindo comparabilidade e reprodutibilidade. Em cargas úteis com alta precisão, banda moderada e potência restrita, conversores sigma-delta ($\Sigma\Delta$) são adequados: fornecem ENOB alto com exigências analógicas moderadas, à custa de maior complexidade digital ([1, 2]). Filtros de decimação e lógica de temporização determinam largura de banda efetiva e latência ([3]); o *noise shaping* desloca o ruído de quantização para fora da banda e afeta métricas dinâmicas ([1]).

As avaliações consideram SNR, ENOB, THD, SFDR, latência, PSRR e CMRR, todos sensíveis ao caminho físico de referências, sinais e relógios. Para medições dinâmicas, coerência espectral e escolha de janela são determinantes para evitar *leakage* e viés das métricas ([4]). O *jitter* do relógio impõe limite prático ao SNR em altas frequências de entrada, descrito por modelos consolidados ([5]).

O ambiente espacial requer controle consistente de temperatura e dose total de radiação (TID). Procedimentos, arquivos de configuração, versões de firmware e registros ambientais devem ser padronizados para permitir comparação entre medições equivalentes.

Este artigo organiza: (i) a arquitetura $\Sigma\Delta$ e os sinais de controle, que definem referências de operação e leitura; (ii) as métricas e suas convenções de cálculo e normalização; e (iii) os procedimentos em corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), vinculando cada medição às condições instrumentais necessárias. Sincronismo de leitura, coerência espectral e documentação de ensaio são mantidos ao longo do texto para assegurar rastreabilidade e reprodutibilidade.

2 Arquitetura $\Sigma\Delta$ e Sinais de Controle

Um conversor $\Sigma\Delta$ combina um modulador sobreamostrado a uma cadeia de filtragem e decimação. No modulador, integradores acumulam o erro entre a entrada e o sinal quantizado retroalimentado, deslocando o ruído de quantização para fora da banda útil (*noise shaping*). A seção digital subsequente remove esse conteúdo fora de banda sem degradar o sinal na banda de interesse. A razão de sobreamostragem (OSR) deve equilibrar custos e benefícios: aumentar o OSR eleva a frequência de *clock*, a latência de grupo e a largura do caminho de dados, ao mesmo tempo em que reduz o ruído na banda e alivia exigências analógicas.

A cadeia digital tipicamente combina estágios *CIC* e filtros *FIR* polifásicos. As respostas de magnitude e fase precisam ser conhecidas para atender às especificações espectrais e para calcular a latência total. Em *FIR* de fase linear, o atraso médio é aproximado por $(M - 1)T_s/2$. Em cadeias com *CIC*, a latência cresce em degraus definidos pela ordem e pelo fator de decimação; esses parâmetros devem constar do relatório de caracterização.

O *clock* e o *jitter* impõem limites ao SNR, especialmente para tons próximos ao limite superior da banda (limite aproximado por

$$\text{SNR}_{\text{jitter}} \approx -20 \log_{10} \left(2\pi f_{\text{in}} t_j \right).$$

A consistência temporal dos sinais de controle define quando os dados estão prontos e quando devem ser transferidos. Os sinais CLK, EN/START, DRDY/EOC e RST devem ser tratados como referências temporais. Quando DRDY/EOC está disponível, a aquisição deve ser sincronizada à sua borda, pois esse pulso incorpora a latência do caminho de filtragem. Em sistemas multicanais, SYNC (ou *frame sync*) compartilhado evita *skew* entre canais e preserva alinhamento de fase.

A implementação física deve minimizar laços de terra, estabelecer caminhos previsíveis para

referências e retornos e proteger interfaces contra ESD sem introduzir ruído. Recomenda-se: roteamento curto para referências, separação entre domínios analógico e digital e blindagem de trechos sensíveis. Muitos desvios de desempenho decorrem de cabeamento, *ripple* de alimentação ou acoplamentos próximos a conectores e conversores de nível; esses pontos devem ser verificados antes de atribuir limitações ao conversor.

Sinais e temporização de leitura

As convenções de temporização usadas no ensaio e no relatório estão na Tabela 1; os parâmetros e símbolos recorrentes aparecem na Tabela 2. Essas duas tabelas padronizam janelas de captura e notação. A descrição detalhada dos sinais de controle/dados encontra-se na Tabela 3.

Tabela 1: Convenções de temporização (resumo para ensaio e relatório)

Parâmetro	Definição prática no ensaio	O que registrar no relatório
t_{valid}	Tempo entre a borda de DRDY/EOC e dados estáveis na interface.	Valor nominal/medido e incerteza; dependências (OSR, cadeia CIC/FIR).
$t_{\text{setup}}, t_{\text{hold}}$	Janela de captura segura em torno da borda de referência.	Borda utilizada (subida/descida), margens aplicadas e método de verificação.
Latência total	Soma dos atrasos de filtragem/decimação + caminho digital até a interface.	Decomposição (CIC, FIR, buffers), OSR, f_s , modo de operação.
<i>Skew</i> inter-canais	Diferença de tempo entre canais simultâneos.	<i>Skew</i> medido/estimado ($< 5\% T_s$), uso de SYNC , comprimento de cabos.

Tabela 2: Parâmetros e símbolos usados neste artigo

Símbolo	Unidade	Significado
T_s	s	Período de amostragem ($T_s = 1/f_s$).
f_s	Hz	Frequência de amostragem.
f_{in}	Hz	Frequência do tom de entrada (ensaio senoidal).
N	—	Número de amostras da janela (FFT).
t_j	s (RMS)	<i>Jitter</i> do relógio (incerteza temporal RMS).
FSR	V (pp)	Faixa total de entrada (<i>Full-Scale Range</i>).
SNR	dBFS	Relação sinal-ruído (sem distorção).
THD	dB	Distorção harmônica total.
SFDR	dB	Faixa dinâmica livre de espúrios.
SINAD	dB	Sinal + ruído + distorção.
ENOB	bits	Número efetivo de bits ($ENOB = \frac{SINAD(dB) - 1,76}{6,02}$).
INL, DNL	LSB	Não linearidades integral e diferencial.
OSR	—	Razão de sobreamostragem.
PSRR	dB	Rejeição a variações de alimentação.
CMRR	dB	Rejeição a sinal em modo comum.

Nota: manter retornos e referências próximos aos pinos, minimizar laços de terra, blindar trechos sensíveis e evitar acoplamento entre CLK/SCLK e linhas analógicas. Documentar borda ativa, polaridade, f_s , OSR, modo (single-ended/diferencial) e mapa de pinos.

Tabela 3: Sinais de controle e dados — funções e observações de temporização

Sinal	Tipo	Função/Definição	Observações de temporização / Boas práticas
CLK	Entrada	Relógio do conversor; define a cadência do modulador e dos filtros de decimação.	<i>Jitter</i> RMS t_j limita o SNR: $\text{SNR}_{\text{jitter}} \approx -20 \log_{10}(2\pi f_{\text{in}} t_j)$. Preferir roteamento curto e retorno próximo; evitar acoplamento em trilhas analógicas.
EN/START	Entrada	Habilitação de conversão.	Fixar borda/nível ativos. Garantir estabilidade da referência antes de habilitar; registrar latência até dados válidos.
RST	Entrada	Reset síncrono/assíncrono para estado conhecido.	Após RST, descartar amostras até regime estacionário (latência total CIC+FIR e buffers).
DRDY/EOC	Saída	Pulso “dado pronto”/“fim de conversão”; referência de <i>timing</i> de leitura.	Ler na borda especificada (tip. subida). Respeitar t_{valid} , t_{setup} , t_{hold} . Ideal sincronizar a captura à borda de DRDY/EOC.
SYNC/ <i>frame sync</i>	Entrada	Alinha quadros/canais em sistemas multicanais.	Compartilhar SYNC e parrear cabos; alvo de <i>skew</i> < 5% de $T_s (= 1/f_s)$. Registrar topologia.
CS, SCLK, MOSI, MISO	I/F SPI	Seleção e dados da interface.	SCLK derivado/temporizado para não violar a janela relativa a DRDY/EOC. Verificar níveis lógicos e terminação.
DOUT/DIN	Dados	Linhas seriais/paralelas de dados do ADC.	Documentar polaridade ativa, ordem de bits, impedância e eventual <i>tri-state</i> . Evitar reflexões com terminação adequada.

3 Métricas e Critérios de Avaliação

Estáticas. Precisão estática (offset e erro de ganho) é obtida por regressão linear sobre amostras distribuídas no intervalo de conversão. Dez a vinte pontos fornecidos por fonte de precisão costumam bastar para $R^2 > 0,999$; a inspeção dos resíduos revela assimetrias e não linearidades de baixa ordem. Para *missing codes* e homogeneidade de degraus, usa-se rampa lenta com histograma: uma excitação monotônica e estável visita todos os códigos

com probabilidade aproximadamente uniforme, e a altura das barras indica a largura efetiva de cada degrau. A partir desse histograma, calculam-se DNL e INL com cuidado numérico adequado.

Dinâmicas. Em medições senoidais, THD agrega a potência dos harmônicos (não linearidades), SFDR considera o pior espúrio, e SINAD soma ruído e distorção. O ENOB decorre de

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SINAD}(\text{dB}) - 1,76}{6,02}.$$

Para validade dos resultados, é essencial amostragem coerente: escolher N e f_{in} tais que $Nf_{\text{in}}/f_s \in \mathbb{Z}$, tornando o período do tom submúltiplo exato da janela da FFT. Caso contrário, o vazamento espectral eleva artificialmente o piso de ruído e contamina a potência do fundamental.

Jitter. O jitter de *clock* limita o SNR, sobretudo para tons próximos ao limite de banda:

$$\text{SNR}_{\text{jitter}} \approx 20 \log_{10} \left(\frac{1}{2\pi f_{\text{in}} t_j} \right).$$

Valores crescentes de t_j alargam o pico fundamental e elevam o piso de ruído. Em ensaios comparativos, variar controladamente as condições de *clock* ajuda a distinguir limitações do dispositivo das causadas pela temporização.

Rejeições. PSRR e CMRR quantificam sensibilidade a perturbações de alimentação e a sinais em modo comum. Durante a caracterização, medem-se não apenas os valores máximos de rejeição, mas também sua variação com a frequência. Em ambientes com fontes chaveadas e *transceivers* de alta velocidade, leituras em frequências específicas evidenciam a eficácia de filtros e do desacoplamento.

4 Setups e Procedimentos de Medição

As medições utilizam dois arranjos complementares: corrente contínua (CC) para métricas estáticas e corrente alternada (CA) para métricas dinâmicas. A execução deve incluir verificações elétricas, controle ambiental, sincronismo de leitura e registro completo de metadados para reprodutibilidade.

Arranjo de CC (estático). Fontes de precisão aplicam níveis definidos com referências e retornos próximos ao ADC. Antes das medições, estabilizar temperatura ambiente (ex.: $25 \pm 1^\circ\text{C}$) e aguardar tempo de aquecimento dos instrumentos.

- *Sanidade elétrica:* medir *ripple* de alimentação na entrada do ADC e no pino de referência usando sonda adequada (x10, baixa capacitância). Registrar $\text{ripple}_{\text{pp}}$ e

espectro até, pelo menos, a 10^a harmônica da frequência de comutação da fonte. Confirmar deriva da referência (datasheet + leitura real) e quedas de cabo (diferença entre fonte e pino do dispositivo sob corrente).

- *Regressão estática*: aplicar 10–20 níveis uniformemente distribuídos na faixa útil (preferir pontos próximos às extremidades e no centro). Registrar pares (tensão, código). Ajustar reta $y = ax + b$ e reportar offset (b), erro de ganho (a vs ideal) e R^2 . Inspeccionar resíduos para assimetria ou curvatura de baixa ordem.
- *Histograma/DNL/INL*: excitar o ADC com rampa lenta e monotônica. Ajustar a inclinação para obter ≥ 50 hits por código sem induzir deriva térmica; como referência prática, garantir velocidade de rampa tal que a variação por período de amostragem seja $\Delta V \ll 0,2$ LSB. A partir do histograma, calcular DNL e INL com correções de borda e normalização por contagem média de códigos.
- *PSRR*: variar VDD por passos conhecidos (ex.: $\pm 1\%$, $\pm 2\%$) mantendo a entrada fixa; correlacionar a variação de saída (ΔOutput) com ΔVDD e expressar PSRR(f) em dB. Quando possível, injetar modulação senoidal em VDD e medir resposta na saída digital por análise espectral.
- *CMRR*: com entrada diferencial, injetar modo comum controlado mantendo o diferencial ideal (zero ou valor-alvo) e quantificar a rejeição ao longo da banda. Avaliar pontos próximos a frequências de interferência conhecidas (50 Hz e 60 Hz) e bandas de 100 kHz–10 MHz típicas de fontes chaveadas e *SerDes*.
- *Boas práticas físicas*: minimizar laços de terra; manter referência e retorno curtos e pareados; usar blindagem em trechos sensíveis; aplicar ESD-safe. Registrar comprimentos de cabos, conectores e pontos de fixação.

Arranjo de CA (dinâmico). Um gerador senoidal de baixo ruído fornece o tom de teste; o condicionamento garante uso da faixa dinâmica sem saturação. A leitura é sincronizada ao pulso de disponibilidade do dado (DRDY/EOC, quando existente).

- *Condição de entrada*: definir amplitude alvo entre 0,5 e 0,9 FSR para evitar saturação e maximizar SNR. Inserir, quando necessário, filtro anti-alias e atenuadores para casar impedâncias e reduzir espúrios por reflexão.
- *Coerência espectral*: escolher N , f_s e f_{in} tais que $Nf_{\text{in}}/f_s \in \mathbb{Z}$, garantindo que o período do tom seja submúltiplo exato da janela. Preferir $N = 2^k$ para FFT. Quando coerência exata não for possível, documentar a janela usada e o erro de coerência.
- *Janela e processamento*: usar janela Hann como padrão (lóbulo principal estreito com atenuação lateral moderada); preferir Blackman quando a supressão de lóbulos

laterais for crítica. Remover o fundamental com banda de exclusão (1–3 bins ao redor do pico, conforme largura do lóbulo) e excluir harmônicos para THD/SINAD conforme definição adotada. Executar média espectral (Welch) quando necessário e registrar o número de médias.

- *Varredura em frequência:* varrer 2–3 décadas na banda de interesse com passos logarítmicos (ex.: 12–24 pts/década). Em cada ponto, coletar janelas suficientes para estabilizar métricas (critério: variação $< 0,1$ dB entre médias).
- *Mapas $ENOB \times f$:* consolidar SINAD por frequência e converter para ENOB; identificar faixas estreitas com espúrios dirigidos. Complementar com SNR, THD e SFDR por frequência para localizar causas (não linearidade vs acoplamentos).
- *Jitter de clock:* estimar limite por $SNR_{\text{jitter}} \approx 20 \log_{10} \left(1 / (2\pi f_{\text{in}} t_j) \right)$. Em ensaios comparativos, variar deliberadamente t_j (fonte de *clock* alternativa, cabo longo/curto, atenuador) para distinguir limitações do DUT das causadas pela temporização.

Protocolo unificado e controle de qualidade.

- *Sequência:* (1) verificações preliminares (alimentação, referência, cabos, estabilidade térmica); (2) regressão e histograma no arranjo de CC; (3) ensaios senoidais no arranjo de CA com coerência garantida; (4) repetição de pontos críticos em dias distintos para avaliar reprodutibilidade.
- *Metadados obrigatórios:* versão de firmware, configuração de filtros/decimação, OSR, f_s , janela FFT, N , número de médias, amplitude e impedância do gerador, temperatura, umidade, data/hora, números de série dos instrumentos, cabos e comprimentos, topologia de terra.
- *Orçamento de incerteza:* listar contribuições dominantes (ruído da fonte, quantização do gerador, tolerância de atenuadores, jitter, erro de coerência, *leakage* residual) e fornecer estimativa de incerteza expandida para SNR/SINAD/ENOB e para offset/ganho/DNL/INL.
- *Aceitação de dados:* definir critérios objetivos (ex.: variação $< 0,1$ LSB em offset/ganho entre repetições; variação $< 0,2$ dB em SINAD entre médias). Rejeitar amostras que violem saturação, *clipping* ou coerência.

Registro recomendado. Documentar: janela da FFT, tamanho N , número de médias, filtros em cascata, pontos de injeção de ruído identificados, anomalias por frequência, e quaisquer desvios de procedimento. Esse detalhamento viabiliza repetibilidade e comparação entre campanhas, bem como auditoria posterior dos resultados.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou um roteiro contínuo e reproduzível para caracterização de ADCs $\Sigma\Delta$ em aplicações espaciais, cobrindo: (i) arquitetura e sinais de controle; (ii) métricas e critérios; e (iii) procedimentos de medição em CC e CA com requisitos claros de coerência, temporização e documentação. O protocolo padroniza coleta, processamento e reporte, viabilizando comparações entre sessões e dispositivos e sustentando decisões de projeto sob restrições de potência e latência.

A ênfase em amostragem coerente, controle de *jitter*, registro completo de metadados e verificação sistemática de *PSRR/CMRR* reduz ambiguidade de interpretação e evita falsas conclusões atribuídas ao conversor quando a causa está no *setup*. Como resultado, os indicadores (offset, ganho, DNL/INL, SNR, ENOB, THD, SFDR e latência) passam a refletir, de forma consistente, o comportamento do dispositivo nas condições especificadas, fornecendo base objetiva para seleção de parâmetros e trade-offs de projeto.

Referências

- [1] R. Schreier and G. C. Temes, *Understanding Delta-Sigma Data Converters*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2005.
- [2] S. R. Norsworthy, R. Schreier, and G. C. Temes, *Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation*. New York, NY: IEEE Press, 1997.
- [3] E. B. Hogenauer, “An economical class of digital filters for decimation and interpolation,” *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 29, no. 2, pp. 155–162, 1981.
- [4] F. J. Harris, “On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, 1978.
- [5] W. Kester, “Mt-007 tutorial: Aperture time, aperture jitter, and aperture delay time—definitions, measurement, and analysis,” Analog Devices Application Note (MT-007), 2009, acessado em: 3 de novembro de 2025. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-007.pdf>