

Características da conversão analógico-digital (ADC – Analog to Digital Conversion) nativa do microcontrolador ESP32: uma discussão da aplicação no Sistema Ciberfísico de Eficiência Energética e Condicionamento Ambiental de Escritórios

Bolsista Ranulfo Acir de Oliveira Resende (CTI) ranulfo.resende@cti.gov.br

Antonio Pestana Neto (CTI) antonio.pestana@cti.gov.br

Josué J G Ramos (CTI) josue.ramos@cti.gov.br

Resumo

Este documento descreve características da amostragem ADC nativa do microcontrolador ESP32, evidenciando sua viabilidade na aplicação em um projeto de condicionamento ambiental e eficiência energética em que se calcula potência ativa e a DHT de uma linha monofásica.

Palavras-chave: conforto ambiental, Distorção Harmônica, programação, tempo real.

1. Introdução

Este artigo apresenta uma breve discussão sobre as limitações e características da amostragem ADC (*Analog-to-Digital Conversion* – ADC) nativa do microcontrolador ESP32 (ESPRESSIF, 2022c), um dos dispositivos recentemente de grande interesse em aplicações em IoT (*Internet of Things*).

O assunto é de interesse especial, na medida em que o aproveitamento da amostragem ADC nativa do microcontrolador em aplicações clássicas (SCIENCEDIRECT, 2022) permite dispensar um módulo ADC externo específico que, eventualmente adicionado a um projeto, acarretaria incremento de complexidade de desenvolvimento e custo.

Entender as limitações da amostragem ADC nativa do ESP32 permite utilizá-lo com maior economia e simplicidade.

Apresentamos aqui algumas limitações e particularidades não explicitamente citadas na documentação fornecida pelos fabricantes, mas de grande importância para o desenvolvedor. Aplicações como o cálculo de Distorção Harmônica Total (DHT) via Transformada Discreta de Fourier são fortemente impactadas pelas limitações, por exemplo, da máxima taxa de amostragem.

As limitações levantadas podem balizar as considerações sobre a viabilidade da utilização da amostragem ADC nativa do ESP32 em função dos requisitos de análise e processamento de sinais no domínio da frequência, além das características da resolução da discretização e limites do sinal a ser amostrado.

A próxima seção apresenta uma sucinta descrição do projeto em que estas considerações foram investigadas e aplicadas.

2. Apresentação do Projeto de Eficiência Energética e Conforto Ambiental

O projeto de nome Sistema Ciberfísico de Eficiência Energética e Condicionamento Ambiental de Escritórios, em que a presente discussão sobre amostragem ADC foi aplicada, foi bem descrito em (PESTANA, 2022), tanto nos aspectos conceituais e técnicos como na apresentação dos resultados iniciais.

O projeto utiliza módulos ambientais que registram a temperatura e a umidade ambientes, juntamente com modulos de energia e atuadores de equipamentos de climatização, com objetivo de coletar dados para realizar um processamento e controle automatizado que forneça conforto ao usuário com eficiência energética.

Foram realizadas coletas de dados ambientais desde junho de 2021. O projeto está amadurecido para prosseguir na coleta de dados de energia e desenvolver o controle automatizado.

O módulo de energia é constituído de um microcontrolador ESP32 que utiliza um transdutor de tensão e um transdutor de corrente para digitalizar a tensão e a corrente de uma linha monofásica e estimar os indicadores de energia como potência ativa e distorção harmônica total tanto da corrente e da tensão. A Fig. 1 ilustra o módulo de energia.

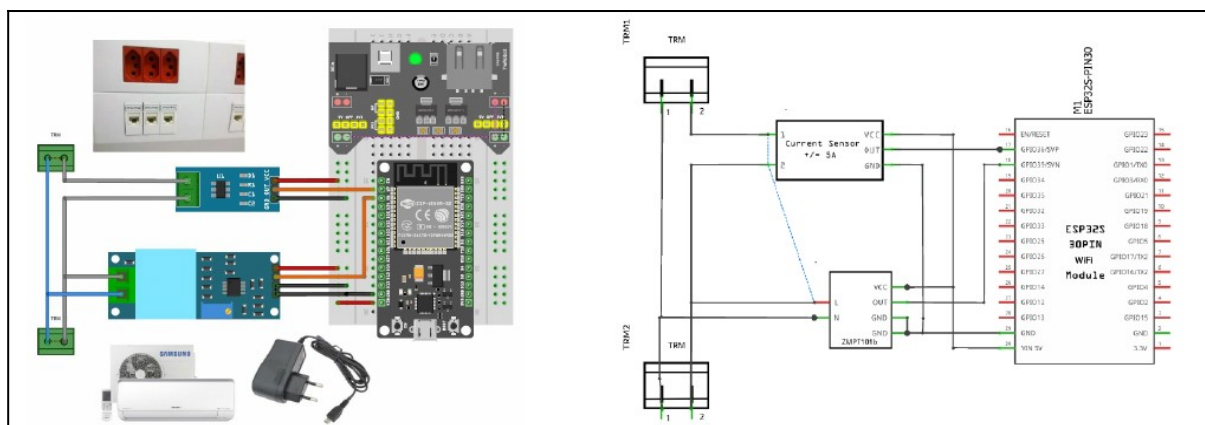


Figura 1 – Módulo de energia com transdutores de tensão e de corrente. Fonte:os autores.

A discussão aqui apresentada aborda apenas um aspecto do projeto, contudo, do ponto de vista técnico, é possível estender o detalhamento de diversos aspectos do projeto seja nos módulos microcontrolados, seja nas plataformas de monitoramento e processamento dos dados (Node-red e EmonCMS), ou mesmo no código das diversas unidades de *software*.

Apenas para exemplificar, considerando simplesmente um dos pontos cruciais do “design” e do desenvolvimento, comentamos o problema do sincronismo das tarefas de tempo real com uma base de tempo SNTP (Simple Network Time Protocol), uma versão simplificada do NTP (Network Time Protocol), conforme (NETWORK TIME FOUNDATION, 2022).

As ferramentas da ESPRESSIF (ESPRESSIF, 2022c) para programação em tempo real de seus *chips* são satisfatoriamente descritas e documentadas quando se considera requisitos usuais de periodicidade e controle do estado das tarefas. No entanto, a sincronização de uma determinada tarefa com um relógio externo, como uma base de tempo SNTP, não é algo trivial e não existem funções nativas das ferramentas para esta finalidade. O programador necessita desenvolver seu próprio mecanismo de controle de código para, por exemplo, assegurar que determinada parte do código da tarefa seja executada repetidamente em determinadas janelas de tempo sincronizadas com um relógio externo via SNTP (por exemplo, a cada 10^o segundo, ou em segundos múltiplos de 10, ou em qualquer “janela” específica de segundo).

O requisito de sincronismo com relógio externo SNTP deve considerar latências e variabilidades (*jitter*) na comunicação de acesso à Internet.

Da mesma forma, é possível detalhar aspectos específicos do projeto como a conexão Wifi, do protocolo MQTT¹, do acesso ao banco de dados, da programação de interfaces com os usuários, do processamento digital de sinais, do cálculo energético e da Distorção Harmônica Total (DHT), do gerenciamento das plataformas de monitoramento, do protocolo e mensagens de controle etc.

Escolhemos para discorrer neste documento um recorte que aborda alguns aspectos da amostragem ADC nativa do ESP32, o que será apresentado na próxima seção.

3. Limitações e características da amostragem ADC nativa do ESP32

Os requisitos de amostragem do projeto foram definidos por questões técnicas relevantes da aplicação, em especial, pelas limitações impostas pelo cálculo da potência ativa e DHT.

Para se realizar estes cálculos em uma linha monofásica o projeto adotou a abordagem de utilizar um transdutor de tensão e um transdutor de corrente, cada um com seu circuito condicionador de sinal, para dois sinais de tensão com limites de 1,0V DC e com variação de 0,8V em amplitude.

Adicionalmente, por restrições do cálculo da potência ativa e DHT, deve-se ter um ciclo de amostragem que seja múltiplo do período da frequência fundamental (16,6ms @ 60Hz). Desta forma, adotou-se, neste projeto, o período de 50ms para o ciclo completo de amostragem ADC.

Em um ciclo completo de amostragem deve-se digitalizar um número específico “N” de amostras temporais dos sinais de corrente e de tensão com objetivo de calcular a potência ativa e DHT via Transformada Discreta de Fourier (DFT).

No cálculo da potência ativa e da DHT em sistemas ideais e com carga resistiva, estes sinais condicionados estariam em fase. Por limitações físicas dos transdutores, ambos sinais condicionados são em geral defasados em relação aos sinais medidos e, obviamente, também entre si, conforme Fig. 2.

Assim, para os cálculos em condições reais é imperativo corrigir a defasagem inserida pelos transdutores. A abordagem do projeto para implementar esta correção foi de deslocar o vetor completo do sinal da corrente por “d” amostras no tempo em relação ao vetor da tensão.

1 MQTT é um padrão de conectividade para dispositivos de Internet das Coisas (IoT), que é simples, leve e baseado em publicações e assinaturas de tópicos de mensagens (OASIS, 2022).

No projeto, o valor da defasagem ideal “d” foi experimentalmente ajustado em testes com carga resistiva.

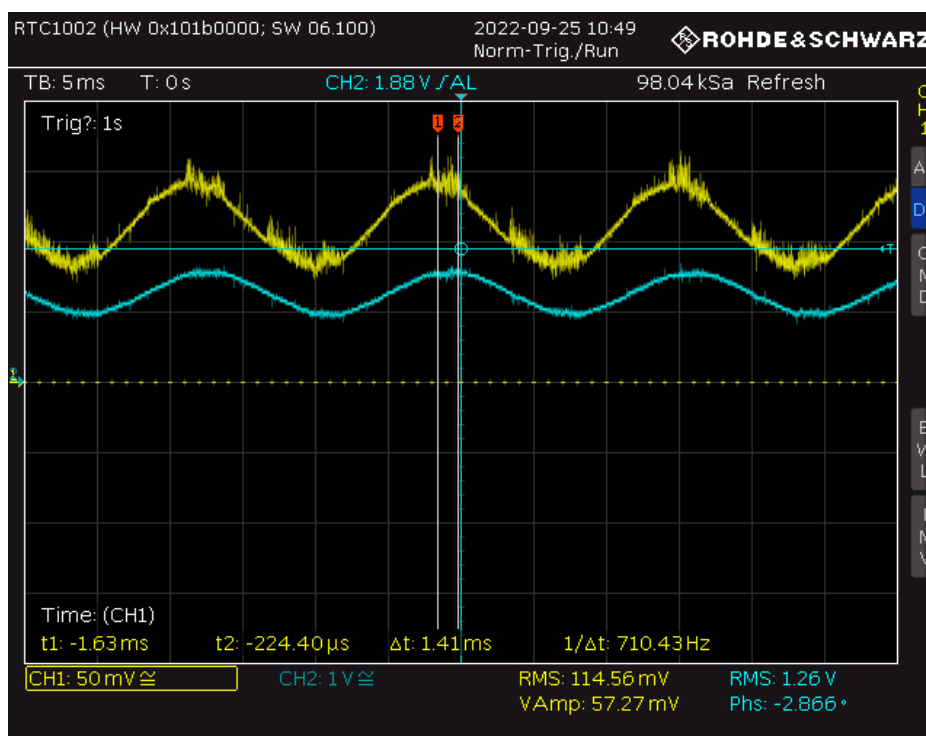


Figura 2 – Defasagem entre os sinais de tensão e corrente. Fonte:os autores. Fonte:os autores.

O que se verifica é que quanto mais alta for a taxa de amostragem é possível ganhar resolução na correção da defasagem e aumenta-se a amplitude do espectro de frequência considerado, mas perde-se com maior tempo de processamento nos cálculos da DHT.

Deseja-se, portanto, que a amostragem ADC seja de taxa tão elevada quanto for possível pelo cálculo da DHT. No projeto, as amostragens de ambos sinais de tensão e de corrente foram feitas continua e concomitantemente, com cada amostra sendo armazenada em respectivo “buffer” circular que são descarregados periodicamente no momento dos cálculos da potência ativa e DHT.

O sistema de amostragem nativa do ESP32 é muito bem descrito pela documentação oficial em (ESPRESSIF, 2022a).

A primeira observação a ser considerada é que a documentação oficial apresenta 18 canais de amostragem disponíveis em dois ADCs que operam com a técnica de aproximação sucessiva (SAR -Successive Approximation Register) e possuem um tempo de processamento inerente ao *hardware*.

Considerando-se que existem dois ADCs, poderia-se cogitar em utilizar ambos concomitantemente de modo se ter um único tempo de processamento da amostragem. Contudo, esta abordagem se demonstrou inviável no projeto devido ao fato do ADC2 possuir limitações de utilização conjunta com o Wifi.

De forma que a necessidade de se utilizar o Wifi para comunicar no protocolo MQTT e enviar os dados de energia determinam a utilização de apenas o ADC1. Esta restrição resultou que a

digitalização de dois sinais (tensão e corrente) implicasse o tempo dobrado de processamento de amostragem.

Assim, foi imperativo tentar descobrir a frequência máxima de amostragem. A técnica para codificar a amostragem dos sinais foi de utilizar uma função apenas para amostrar os dois canais e armazenar nos respectivos “buffers” com uma sinalização de “buffer” cheio.

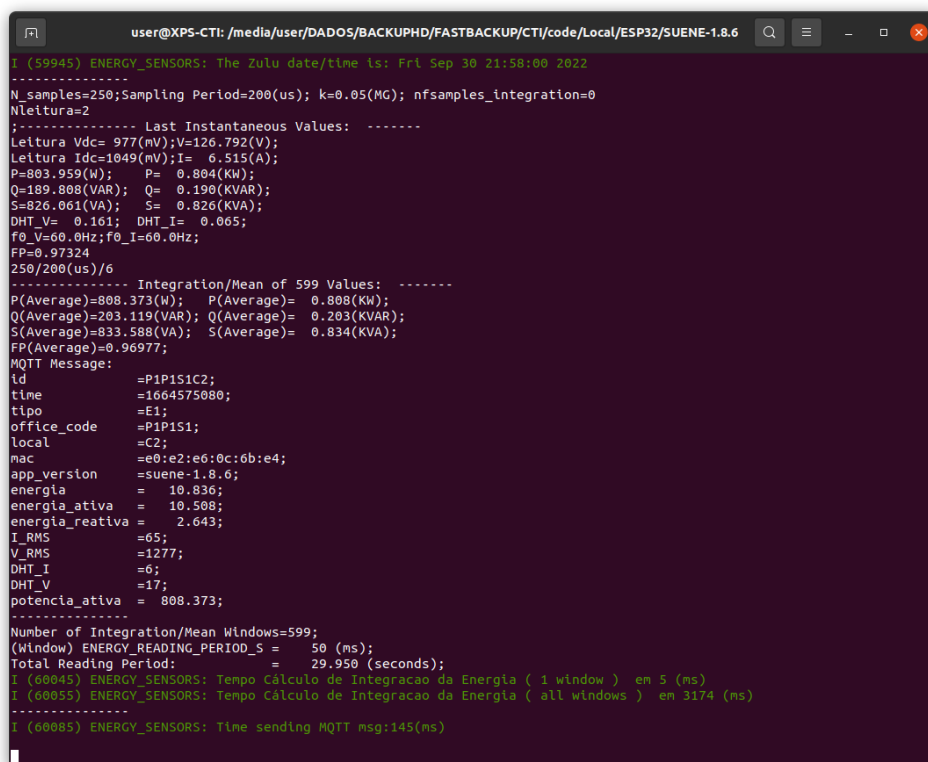
Esta função foi registrada para execução periódica por meio de um temporizador de alta resolução (HRT) (ESPRESSIF, 2022b).

De acordo com a documentação oficial, a periodicidade mínima de HRT é de 50us, o que fornece uma taxa de amostragem máxima, em tese, de 20KHz.

Em verificação experimental, tentou-se digitalizar apenas um canal nesta taxa de amostragem, mas sem sucesso. O processamento SAR (Successive Approximation Register) da amostragem certamente foi mais longo e provocou o acionamento do temporizador vigia (“watchdog timer”) do microcontrolador.

Após várias tentativas, verificou-se que com o período de 80us para amostragem de um canal obtinha-se o processo de digitalização estável e sem acionamento do temporizador vigia (“watchdog timer”).

A aplicação no projeto foi de considerar a amostragem de dois canais a cada 200us (5KHz), num total de 250 amostras por canal no ciclo de 50ms, conforme Fig. 3.



```
user@XPS-CTI: /media/user/DADOS/BACKUPHD/FASTBACKUP/CTI/code/Local/ESP32/SUENE-1.8.6
I (59945) ENERGY_SENSORS: The Zulu date/time is: Fri Sep 30 21:58:00 2022
-----
N_samples=250;Sampling Period=200(us); k=0.05(MG); nfsamples_integration=0
NLeitura=2
;----- Last Instantaneous Values: -----
Leitura Vdc= 977(mV);V=126.792(V);
Leitura Idc=1049(mV);I= 6.515(A);
P=803.959(W); P= 0.804(KW);
Q=189.808(VAR); Q= 0.190(KVAR);
S=826.061(VA); S= 0.826(KVA);
DHT_V= 0.161; DHT_I= 0.065;
f0_V=60.0Hz;f0_I=60.0Hz;
FP=0.97324
250/200(us)/6
----- Integration/Mean of 599 Values: -----
P(Average)=808.373(W); P(Average)= 0.808(KW);
Q(Average)=203.119(VAR); Q(Average)= 0.203(KVAR);
S(Average)=833.588(VA); S(Average)= 0.834(KVA);
FP(Average)=0.96977;
MQTT Message:
id =P1P1S1C2;
time =1664575080;
tipo =E1;
office_code =P1P1S1;
local =C2;
mac =e0:e2:e6:0c:6b:e4;
app_version =suene-1.8.6;
energia = 10.836;
energia_ativa = 10.508;
energia_reativa = 2.643;
I_RMS =65;
V_RMS =1277;
DHT_I =6;
DHT_V =17;
potencia_ativa = 808.373;
-----
Number of Integration/Mean Windows=599;
(Window) ENERGY_READING_PERIOD_S = 50 (ms);
Total Reading Period: = 29.950 (seconds);
I (60045) ENERGY_SENSORS: Tempo Cálculo de Integracao da Energia ( 1 window ) em 5 (ms)
I (60055) ENERGY_SENSORS: Tempo Cálculo de Integracao da Energia ( all windows ) em 3174 (ms)
-----
I (60085) ENERGY_SENSORS: Time sending MQTT msg:145(ms)
```

Figura 3 – O cálculo de potência ativa e DHT com uma carga de teste resistiva.

Fonte:os autores.

A Fig. 3 apresenta a tela de impressão da saída do software embarcado do sistema de medição dos indicadores elétricos que são calculados e informados via mensagem MQTT. São

calculados nível de tensão RMS, corrente RMS, potência ativa, e distorção harmônica total de tensão e de corrente.

Com estes ajustes para amostragem ADC nativa no ESP32 foi possível realizar cálculos que consideraram até a 41^a harmônica.

Dos testes realizados foi possível inferir que os ajustes de amostragem ADC foram adequados aos requisitos do projeto para o cálculo estimado da potência ativa e DHT.

4. Conclusão

Este artigo apresentou uma breve discussão sobre características da amostragem ADC nativa do microcontrolador ESP32.

Foi identificado o limite mínimo de 80 μ s para o período de tempo de amostragem de um canal no microcontrolador ESP32, o que, no projeto, permitiu a amostragem de um canal de tensão e um canal de corrente de forma estável.

O estudo comprovou a viabilidade na aplicação da amostragem ADC nativa do microcontrolador ESP32 em um projeto de condicionamento ambiental e eficiência energética em que se calcula potência ativa e a DHT de uma linha monofásica considerando até a 41^a harmônica.

Referências

ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO., LTD. Analog to Digital Converter (ADC). 2022. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>>

ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO., LTD. High Resolution Timer (ESP Timer).2022. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/esp_timer.html>.

ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO., LTD. Official IoT Development Framework. 2022. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/products/sdks/esp-idf>>.

NETWORK TIME FOUNDATION. Network Time Protocol. 2022. Disponível em: <<https://support.ntp.org/bin/view/Main/WebHome>>.

OASIS, O. for Advancement of S. I. MQTT: The Standard for IoT Messaging. 2022. Disponível em: <<https://mqtt.org/>>.

PESTANA, A. N.; RESENDE, R. A. O.; NICOLAU, M.; PIMENTEL, M. R.; RIBEIRO, R. I.; BERALDO, G. F.; FRUETT, F.; RAMOS, J. J. G. A cyber-physical system for energy efficiency and indoor air conditioning of multiple office rooms. SYMPOSIUM ON IOT (SIOT) AND LATIN AMERICA AND BRAZILIAN CONGRESS ON IOT (LABCIOT). 2022. Disponível em: <<https://iotbrasil.org.br/congresso/2022/>>.

SCIENCEDIRECT. Analog-to-Digital Conversion. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/topics/psychology/analog-to-digital-conversion>>