

## Sincronização de pacotes de dados para PMU a partir de GPS e comunicação sem fio com PDC

## Synchronization of data packets for PMU by GPS and wireless communication with PDC

### RESUMO

A Unidade de Medição Fasorial é um dos elementos fundamentais na obtenção de informações sobre as grandezas presentes em uma rede elétrica. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é o aperfeiçoamento de uma unidade de baixo custo que já encontrava-se em produção pelos discentes da UTFPR campus Pato Branco. Neste trabalho desenvolveu-se um algoritmo para calibragem do sinal de *clock* do microcontrolador e implementou-se a capacidade de transmissão das informações adquiridas pela PMU via *wi-fi*. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois foi possível aumentar a precisão e exatidão da PMU devido a calibragem e realizar a transmissão das informações obtidas pela PMU ao Concentrador de Dados utilizando a rede *wi-fi*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Unidade de medição fasorial. Calibragem. Rede *wi-fi*. Concentrador de dados.

### ABSTRACT

A Phasor Measurement Unit is one of the fundamental elements in obtaining information about the quantities present in an electrical grid. Thus, the objective of this work is the improvement of a low cost unit that was already in production by the students of UTFPR campus Pato Branco. In this work, an algorithm for calibrating the microcontroller clock signal and the ability to transmit the information acquired by the PMU through *wi-fi* connection were implemented. The results obtained were satisfactory, since it was possible to increase the precision and accuracy of the PMU due to calibration and to carry out the transmission of the information obtained by the PMU to the Data Concentrator using the *wi-fi* network.

**KEYWORDS:** Phasor measurement unit. Calibrating. *Wi-fi* network. Data concentrator.

Luiz Antonio Nicolau Anghinoni  
[luizanghinoni@alunos.utfpr.edu.br](mailto:luizanghinoni@alunos.utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Gustavo Weber Denardin  
[gustavo@utfpr.edu.br](mailto:gustavo@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autorial:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

Uma PMU (*Phasor Measurement Unit*) é um dispositivo utilizado para mensurar fasores juntamente com a informações de data e hora que são obtidas precisamente através dos relógios atômicos presente em um sistema de GPS (*Global Positioning System*) (PHADKE; THORP, 2008).

As PMUs são os principais componentes utilizados em Sistemas de Medição Fasorial Sincronizadas (SMFS). Esses têm como objetivo mensurar as grandezas (tensão e corrente) em pontos espalhados de uma rede elétrica, o que torna a PMU um elemento fundamental na coleta dessas informações. Como a rede elétrica possui um grande número de elementos e é extremamente complexa, há a necessidade da utilização de diversas PMUs. Com isso, a viabilidade de implementação de um SMFS na rede é impedido pelos elevados custos das tradicionais PMUs do mercado (GRANDO, 2016).

Uma PMU é composta por seis elementos básicos, são eles: o receptor GPS, o transceptor de comunicação, conversor analógico digital, filtro anti-aliasing, o oscilador e o microcontrolador (GRANDO, 2016).

Uma Unidade de Medição Fasorial Sincronizada (PMU) de baixo custo está em desenvolvimento com o apoio de discentes de mestrado e graduação da UTFPR Campus Pato Branco. No entanto, o dispositivo necessitava de melhorias nas funções já implementadas, e da adição de novas funcionalidades para se tornar um equipamento de uso simplificado e confiável.

No presente trabalho desenvolveu-se um algoritmo para calibragem do sinal de *clock* do microcontrolador utilizado na PMU. Uma base de tempo confiável é de extrema importância para os algoritmos de processamento de sinais da PMU e, portanto, o procedimento de calibração desenvolvido entrega a exata frequência de operação do módulo PLL (*phase-locked loop*) para tais algoritmos.

Adicionalmente, implementou-se uma nova funcionalidade ao dispositivo, a capacidade de transmissão de dados ao Concentrador de Dados (PDC) via *wi-fi*. Tal funcionalidade facilita o uso do equipamento em locais de difícil acesso a rede *ethernet* cabeada.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do projeto utilizaram-se dois microcontroladores. Um dos microcontroladores é responsável pela aquisição e processamento de dados, bem como pela visualização de dados em uma tela LCD e do envio dos fasores ao PDC por ethernet. Já o outro microcontrolador foi utilizado para enviar os dados para o PDC por comunicação sem fio, quando necessário.

O microcontrolador utilizado na PMU foi um STM32F769 por possuir 3 conversores A/D síncronos e alta capacidade de processamento (STMICROELECTRONICS, 2018). Enquanto o utilizado para realizar a transmissão sem fio foi o ESP32, devido ao suporte nativo a comunicação sem fio Wi-Fi (ESPRESIF, 2019). Também foi utilizado um módulo GPS VK16U6, que determina o momento de iniciar uma aquisição de um fasor a partir do sinal PPS (*pulse per second*) e informar a data e hora da geração de tal pulso para a PMU do projeto.

O sinal PPS também foi utilizado para a calibração desenvolvida da frequência de operação do microcontrolador.

O desenvolvimento do presente trabalho se deu em duas etapas principais. A primeira etapa foi o desenvolvimento do algoritmo de calibração da frequência de operação do microcontrolador. Após a análise do código-fonte e realização de testes em laboratório foi possível perceber erros nas medições fasoriais da PMU. Tais erros ocorriam devido conjunto cristal / PLL não entregar a frequência correta aos algoritmos de processamento de sinais. Uma pequena variação na frequência era observada cada vez que o sistema era energizado. Essa mudança se deve às características construtivas do cristal e devido a variação da temperatura do ambiente, o que acaba por comprometer a precisão dos fasores observados pela PMU.

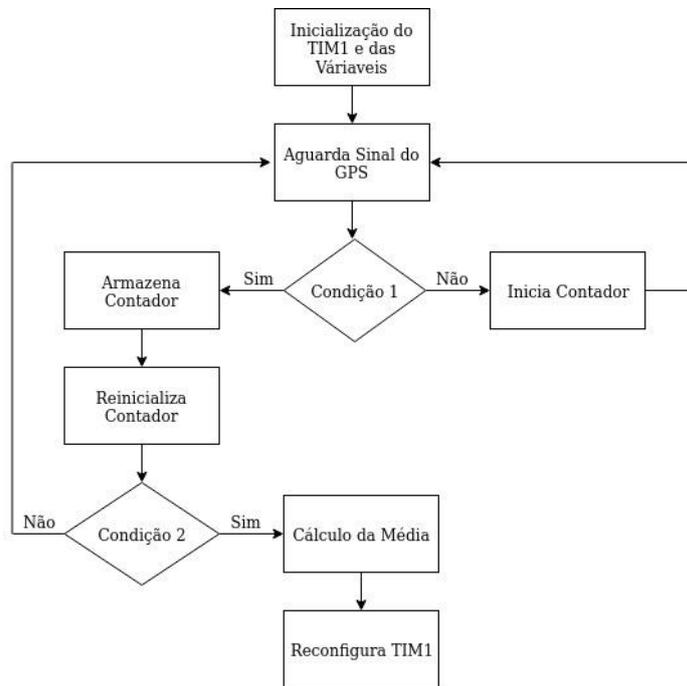
A segunda etapa teve como objetivo dar capacidade de comunicação sem fio a PMU desenvolvida. Como o microcontrolador principal da PMU não possui um módulo de conexão *wi-fi* e, muitos locais em que as PMUs são instaladas não apresentarem estrutura de conexão ethernet cabeada, decidiu-se dar suporte a comunicação sem fio por meio de um segundo microcontrolador. O microcontrolador auxiliar é então responsável pela recepção dos dados calculados pela PMU por uma comunicação serial SPI (*serial peripheral interface*) e da transmissão desses dados para um PDC de acordo com as normas e protocolos estabelecidos no padrão IEEE C37.118.2-2011.

Para a realização da primeira etapa, sugeriu-se a utilização do sinal PPS advindo do GPS. Este pulso ocorre uma vez a cada segundo e é usado para realizar o sincronismo de dados da PMU. No entanto, como a PMU transmite até 30 fasores por segundo, os fasores subsequentes dependem da frequência de *clock* do microcontrolador. No trabalho desenvolvido esse pulso foi utilizado para descobrir a real frequência de operação do microcontrolador antes dos algoritmos de processamento de sinais que calculam os fasores serem iniciados.

O algoritmo de calibração desenvolvido é uma das primeiras fases de boot da PMU, iniciando com a configuração de um temporizador, que é utilizado para determinar o número de ciclos de *clock* que existem entre dois sinais PPS. Enquanto a calibração é realizada, todas as outras tarefas referente a PMU ficam em espera. O processo inicia com a espera de um sinal PPS em uma porta de entrada do microcontrolador. Assim que a porta de entrada percebe uma borda de subida do sinal, o temporizador inicia a contagem. Quando um novo pulso é detectado, o timer é parado e o valor da contagem é armazenada em um vetor. O processo é repetido várias vezes (parâmetro configurável, com padrão de 128 repetições). Ao final de um número específico de repetições de tal processo, uma média entre os valores adquiridos é realizada, sendo o valor encontrado muito próximo ao valor real de operação do *clock* do PLL do microcontrolador. Após a calibragem, o timer é reconfigurado com o valor obtido e a PMU retoma suas atividades.

O fluxograma do algoritmo de calibração pode ser observado no diagrama da Figura 1, onde a Condição 1 é responsável pela verificação da inicialização da contagem e a Condição 2 verifica o número de iterações do algoritmo.

Figura 1 – Diagrama do Algoritmo de Calibragem do Cristal



Fonte: Autoria Própria (2020).

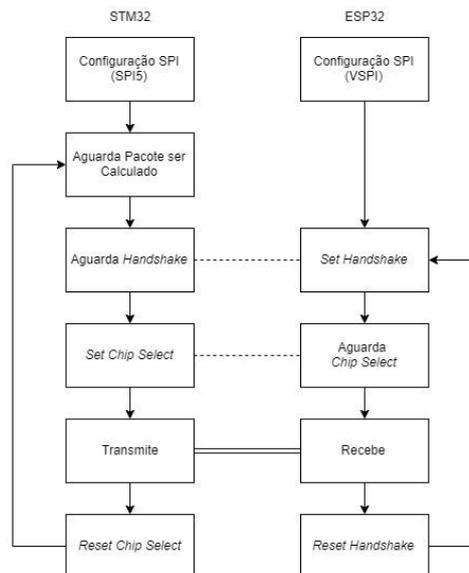
A segunda etapa iniciou com uma análise dos possíveis canais de comunicação serial que poderiam ser utilizados para envio de dados entre os dois microcontroladores. Inicialmente a tentativa era de realizá-la com um protocolo UART (*Universal asynchronous receiver/transmitter*). Porém, devido a indisponibilidade dos pinos referente às UARTs no microcontrolador STM32, optou-se pela utilização da comunicação serial SPI (*serial peripheral interface*). Outra vantagem da utilização da comunicação SPI é uma maior taxa na transmissão dos dados.

O algoritmo de transmissão desenvolvido utiliza dois pinos para sincronismo, um para o *Chip Select* (CS) (ativação do microcontrolador escravo) e outro para o *Handshake* (responsável por informar que o microcontrolador escravo está disponível para recepção um novo pacote de dados). Além disso, utilizou-se os pinos padrão da comunicação SPI: MISO, MOSI e SCK (*clock*).

O pino de *Handshake* é configurado como um pino de entrada no microcontrolador STM32. No momento que há novos dados a serem transmitidos, o estado desse pino informa se o microcontrolador ESP32 está pronto para receber o pacote de dados. Em seguida o pino de CS é alterado para nível lógico baixo, habilitando a recepção no microcontrolador ESP32. Posteriormente o CS é alterado para nível lógico alto para desabilitar a recepção de informações desnecessárias.

O fluxograma do algoritmo utilizado na comunicação pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama do Algoritmo de Transmissão SPI.



Fonte: Autoria Própria (2020).

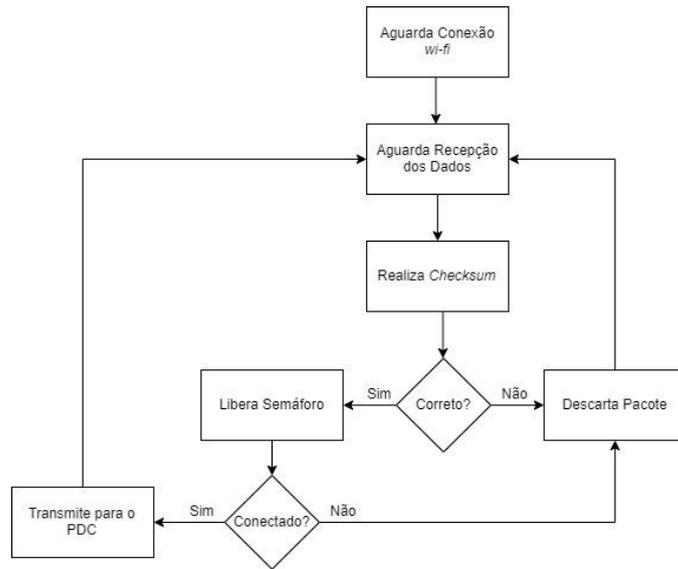
Após a implementação da comunicação SPI, alguns pontos e requisitos tiveram que ser discutidos para se obter um melhor resultado. No código, a inicialização da SPI foi feita juntamente com a inicialização dos demais periféricos, ou seja, no início do firmware. Como o programa está utilizando um RTOS (*real-time operating system*), optou-se por colocar as funções referente a transmissão SPI em uma tarefa. Assim é possível definir uma prioridade em relação às outras tarefas e funcionalidades disponíveis na PMU.

Na tarefa principal da PMU foi adicionada uma condição para que a transmissão SPI ocorra. Verifica-se a existência de uma conexão ethernet ativa. Caso não exista, transfere-se o pacote de dados calculado para o microcontrolador auxiliar por SPI. O algoritmo inicia pela liberação de um semáforo da tarefa de transmissão. A tarefa aguarda esse semáforo, em seguida verifica o número de pacotes que estão aguardando a transmissão. A quantidade de pacotes depende da transmissão das informações de data e hora pelo GPS, podendo ocorrer acúmulo de alguns pacotes de dados.

É importante destacar que os dados recebidos pelo microcontrolador ESP32 são alocados em um vetor e então é realizado o cálculo do *checksum* do pacote. Em seguida compara-se os valores do *checksum* calculado e do recebido pela comunicação. Caso esteja correto, um semáforo é liberado e a transmissão dos dados pelo canal Wifi é realizado.

Para a comunicação sem fio do ESP32 com o software PDC utiliza-se os protocolos de comunicação TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Nesse microcontrolador cria-se um servidor escutando uma porta TCP específica, e aguarda-se pela conexão de um cliente, nesse caso o PDC. A conexão é feita por um socket, que tem a função ligar o servidor com o cliente. Tão logo a conexão entre os dois pontos seja estabelecida, a transmissão inicia. A Figura 3 apresenta o diagrama de funcionamento do ESP e sua transmissão *wi-fi*.

Figura 3 – Diagrama de Funcionamento ESP e wi-fi.



Fonte: Autoria Própria (2020).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a etapa de calibração não foi possível realizar a coleta de resultados com um osciloscópio, devido a pandemia pela COVID-19, pois seria necessário utilizar equipamentos do laboratório. Mas, pela análise das variáveis utilizando o modo de depuração do ambiente de desenvolvimento foi possível comprovar que os valores resultantes condizem com os valores esperados.

Para a etapa de comunicação entre os microcontroladores, utilizou-se tanto de valores fixos como os valores calculados pela PMU. Os resultados obtidos foram de acordo com o esperado. A tarefa de transmissão desempenhou sua função sem interromper as demais funcionalidades da PMU. Ainda, transmitiu corretamente os pacotes de dados de fasores ao PDC. A Figura 4 mostra os dados enviados pela PMU e a recepção no microcontrolador ESP32. Os dados são os 10 primeiros e os 10 últimos valores presente no vetor de transmissão.

Figura 4 – Resultado Comunicação.

Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [152 204 197 66 11 44 103 21 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [152 204 197 66 11 44 103 21 1 1 ]
Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [31 80 68 133 20 123 12 94 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [31 80 68 133 20 123 12 94 1 1 ]
Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [69 136 68 169 239 13 7 159 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [69 136 68 169 239 13 7 159 1 1 ]
Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [171 230 156 77 138 104 69 111 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [171 230 156 77 138 104 69 111 1 1 ]
Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [31 140 196 147 44 180 122 245 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [31 140 196 147 44 180 122 245 1 1 ]
Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [185 86 67 201 200 64 76 232 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [185 86 67 201 200 64 76 232 1 1 ]
Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [138 40 69 188 116 67 131 186 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [138 40 69 188 116 67 131 186 1 1 ]
Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [0 0 197 143 129 40 222 180 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [0 0 197 143 129 40 222 180 1 1 ]
Pacote A Enviar: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [0 0 157 143 129 40 222 180 1 1 ]	Pacote Recebidos: [ 170 1 0 50 0 1 19 22 235 164 ] [2 138 197 13 142 26 112 5 1 1 ]

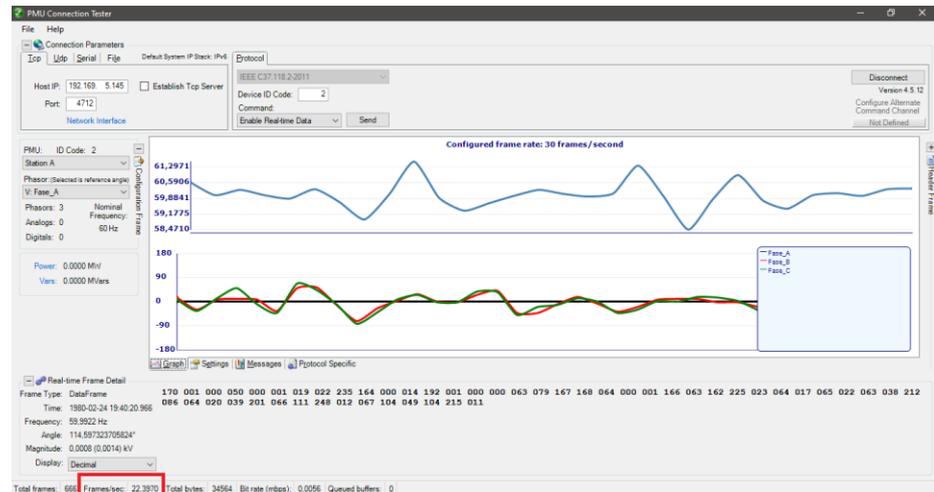
Fonte: Autoria Própria (2020).

A comunicação com o PDC foi feita utilizando os programas OpenPDC e PMUConnectionTester (GRID PROTECTION ALLIANCE, 2020). Em ambos foi possível realizar a comunicação e a transmissão de dados. Para verificar a veracidade das informações, colocou-se uma das entradas ao terra do microcontrolador, e como os gráficos indicam, a tensão recebida foi de aproximadamente zero. A Figura 5 mostra esses dados sendo recebidos e mostrados nos gráficos pelo PMUConnectionTester.

Os resultados obtidos da transmissão se mostram satisfatórios, mas com algumas perdas. Como é possível observar na Figura 5, a taxa de frames/segundo

(destacado em vermelho) recebido é de aproximadamente 23. Idealmente o microcontrolador da PMU envia 30 frames/segundo. Possivelmente há erros de transmissão detectados pelo checksum, e os dados acabam sendo descartados.

Figura 5 – Recebimento das Informações pelo PDC.



Fonte: Aurtoria Própria (2020).

## CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho é o aperfeiçoamento de uma PMU de baixo custo que já encontrava-se em produção pelos discentes da UTFPR campus Pato Branco. Neste, foi possível finalizar as melhorias nas funções já implementadas e a adição da nova funcionalidade proposta.

O algoritmo de calibração permitiu a correção dos erros na medição de fasores presentes no projeto da PMU, possibilitando a recepção de informações da rede elétrica com maior exatidão e precisão.

A utilização do microcontrolador com o módulo *wi-fi* permitiu que os dados possam ser enviados pela PMU e recebidos pelo PDC em pontos onde não há acesso ethernet cabeada, o que amplia as possibilidades de uso da PMU.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo apoio ao projeto de pesquisa e a bolsa concedida, bem como a UTFPR pelo financiamento de equipamentos a partir do Edital PAPCDT.

## REFERÊNCIAS

ESPRESSIF. **ESP32-WROOM-32 Datasheet**. 2019. Disponível em: <[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf)>. Acesso em: 01 ago. 2020.

GRANDO, F. L. **Arquitetura para o desenvolvimento de unidades de medição fasorial sincronizada no monitoramento a nível de distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016.

GRID PROTECTION ALLIANSE. **OpenPDC Documentation**. 2019. Disponível em: <<https://github.com/GridProtectionAlliance/openPDC/wiki/Documentation>>. Acesso em: 28 set. 2020.

STMICROELECTRONICS. **Discovery kit with STM32F769NI MCU**. 2018. Disponível em: <[https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00276557-discovery-kit-with-stm32f769ni-mcu-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00276557-discovery-kit-with-stm32f769ni-mcu-stmicroelectronics.pdf)>. Acesso em: 01 ago. 2020.

THORP, James; PHADKE, Arun G. **Synchronized Phasor Measurements and Their Applications**. 1. ed. [S. l.]: Springer US, 2008. 248 p. ISBN 978-0387765358.