

PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA MONITORAÇÃO SINCRONIZADA DE DADOS SOLARIMÉTRICOS COM ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL

Rodrigo Andrade (UFMG) - rodrigo.andrade@una.edu.br

Samira Fontes Domingos (UFMG) - samirafisica@yahoo.com.br

Luís Guilherme Monteiro (PUC Minas / UFMG) - luis.monteiro@gmail.com

Wallace do Couto Boaventura (Instituição - a informar) - wventura@cpdee.ufmg.br

Resumo:

Este artigo apresenta uma proposta de sistema para medição, monitoração e transmissão de dados solarimétricos em alta resolução temporal e distribuídos espacialmente. Esta plataforma visa a implementação de uma estação solarimétrica, cujo sistema desenvolvido, permitirá a aquisição de dados solarimétricos com transmissão via rede Ethernet e em tempo real sincronizados usando o protocolo PTP (Precision Time Protocol) da norma IEEE 1588, garantindo assim que todas as medições dos sensores distribuídos sejam realizadas no mesmo instante de tempo. Os dados serão armazenados em um servidor on-line MYSQL e poderão ser consultados de qualquer local desde que se tenha acesso ao link da plataforma web de amostragem dos mesmos. A arquitetura será implementada usando componentes de hardware padrão, estrutura de rede básica Ethernet e uma arquitetura x86/x64 sem qualquer sistema operacional especializado. As simulações referenciadas que servirão de base para este trabalho, mostraram boa precisão de sincronização com erro médio variável de 68,07 μ s e 210,95 μ s entre pontos de medição. Considerando-se todos os desvios de frequência de aquisição e erro máximo na ordem de 496,69 μ s, o PTP mostra-se suficientemente eficaz para a proposta de aquisição em tempo real, sincronizada com alta resolução temporal.

Palavras-chave: *Recurso Solar, Monitoração e Medição Distribuída, Protocolo PTP IEEE 1588*

Área temática: *Radiação Solar*

Subárea temática: *Instrumentação vinculada à medições meteorológicas*

PROPOSTA DE PLATAFORMA PARA MONITORAÇÃO SINCRONIZADA DE DADOS SOLARIMÉTRICOS COM ALTA RESOLUÇÃO TEMPORAL

Rodrigo Andrade da Silveira – rodrigo.mackgiver@gmail.com

Samira Fontes Domingos – samirafisica@yahoo.com.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Luís Guilherme Monteiro de Oliveira – luis.monteiro@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Curso de Engenharia Energia

Wallace do Couto Boaventura – wventura@cpdee.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Este artigo apresenta uma proposta de sistema para medição, monitoração e transmissão de dados solarimétricos em alta resolução temporal e distribuídos espacialmente. Esta plataforma visa a implementação de uma estação solarimétrica, cujo sistema desenvolvido, permitirá a aquisição de dados solarimétricos com transmissão via rede Ethernet e em tempo real sincronizados usando o protocolo PTP (Precision Time Protocol) da norma IEEE 1588, garantindo assim que todas as medições dos sensores distribuídos sejam realizadas no mesmo instante de tempo. Os dados serão armazenados em um servidor on-line MYSQL e poderão ser consultados de qualquer local desde que se tenha acesso ao link da plataforma web de amostragem dos mesmos. A arquitetura será implementada usando componentes de hardware padrão, estrutura de rede básica Ethernet e uma arquitetura x86/x64 sem qualquer sistema operacional especializado. As simulações referenciadas que servirão de base para este trabalho, mostraram boa precisão de sincronização com erro médio variável de 68,07 μ s e 210,95 μ s entre pontos de medição. Considerando-se todos os desvios de frequência de aquisição e erro máximo na ordem de 496,69 μ s, o PTP mostra-se suficientemente eficaz para a proposta de aquisição em tempo real, sincronizada com alta resolução temporal.

Palavras-chave: Recurso Solar, Monitoração e Medição Distribuída, Protocolo PTP IEEE 1588.

1. INTRODUÇÃO

É sabido que o conhecimento da radiação solar em uma determinada localidade é fundamental para a instalação adequada dos sistemas solares, tanto sistemas fotovoltaicos quanto sistemas térmicos. A nível nacional, temos duas fontes de dados de radiação solar disponíveis para estudos diversos, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que possuem estações meteorológicas distribuídas e, sendo este último, também utiliza de informações solarimétricas através de imagens de satélites. Estes dados são disponibilizados, publicamente, em médias anuais e mensais do total diário da irradiação Global Horizontal, Difusa, Direta Normal, no Plano Inclinado e PAR em Wh/m².dia, com resolução espacial de 0,1° x 0,1°, aproximadamente 10 km x 10 km, Pereira *et al.* (2017), irradiação global horizontal em médias horárias, em kJ/m², (INMET, 2019) e até mesmo, para algumas localidades brasileiras, médias por minuto das irradiâncias global, direta e difusa (INPE, 2019). No entanto, as medições realizadas por estas estações, como já descrito, nem sempre fornecem dados solarimétricos com uma boa resolução temporal e para todo o território brasileiro.

Alguns protótipos de sistemas de medição de dados solarimétricos, baseado em sistemas eletrônicos embarcados como o que é proposto neste estudo, são sugeridos nos trabalhos de Balan *et al.* (2008) e Belmili *et al.* (2010). Contudo, nas propostas apresentadas nos referidos trabalhos, a metodologia de medição e transmissão de dados difere da proposta apresentada para este estudo atual. Neste trabalho é proposto a utilização de dispositivos de aquisição de dados (*Data Acquisition* - DAQ) com estrutura mais compacta e melhores técnicas de medição, sincronização, comunicação e transmissão de dados, o que permitirá obter êxito na proposta de uma alta resolução temporal dos dados em diferentes pontos de coleta.

Nesta proposta, pretende-se executar medidas da radiação solar com intervalos de tempo de 1 s entre as mesmas. Assim, é preciso que a rede de sensores esteja muito bem sincronizada quanto ao instante exato da execução da medida e captura do dado. Para garantir este sincronismo, será implementada técnica de sincronização de relógios em rede por meio do protocolo PTP, *Precision Time Protocol* (sugerido pela norma IEEE 1588).

Após a coleta dos dados, estes serão enviados a um servidor *Web* que poderá ser acessado de qualquer local desde que se tenha o link de acesso e permissão.

1.1 Objetivo e justificativa

Sem dúvidas uma das partes mais importantes do ramo da engenharia de medição, é a utilização de instrumentos de medição para alcançá-lo. Na grande maioria das vezes, para se executar a medição de uma grandeza, é preciso ter um conjunto de instrumentos associados, ou seja: sensores, transdutores, conversores de sinais, dispositivos de aquisição de dados (DAQ), dispositivos de comunicação em rede. Muitas das vezes, a depender da aplicação, DAQ's precisam ser multicanais ou, como no experimento em questão, carece de medições distribuídas espacialmente.

A plataforma proposta, visa a execução de medidas com resolução temporal de intervalos de pelo menos 1 s entre cada evento. Contudo é preciso garantir que estes dados coletados em pontos distintos estejam com as medições sincronizadas no mesmo parâmetro de tempo. Assim, outro requisito para esta plataforma, vem a ser o monitoramento em tempo real. A definição de tempo real pode diferir para as diferentes aplicações em virtude dos requisitos de cronometragem. Aqui definir-se-á tempo real como a capacidade de coletar dados com a mesma taxa que o usuário requer.

Nas seções posteriores, serão discutidos materiais e métodos, arquitetura do projeto, simulação e os resultados esperados.

2. ARQUITETURA DO SISTEMA

A arquitetura deste tipo de sistema, deve permitir a aquisição, a verificação, a transmissão e o armazenamento de múltiplos dados solarimétricos em um formato definido. Para esta proposta de experimento, é apresentada uma arquitetura para medição, verificação, transmissão e aquisição de dados distribuídos espacialmente e com alta resolução temporal. Como prova de conceito pretende-se utilizar na implementação de base, componentes de *hardware* existentes e protocolos de rede do tipo *Ethernet* e TCP/IP com aplicação em nuvem, e um protocolo de sincronização de relógio para que as medições dos vários sensores sejam feitas no mesmo instante de tempo.

2.1 Hardware de aquisição de dados e conexão de rede Ethernet

Dentre os diversos *hardwares* disponíveis no mercado que poderiam ser utilizados para fazer a aquisição de dados, optou-se pelo Kit de Desenvolvimento Hercules™ TMS570LC43x LaunchPad™; que é uma placa de circuito impresso inteligente da *Texas Instruments*®, que possui unidade de processamento baseada em microprocessadores ARM® Cortex®-R5F com 300 MHz em *cache*, projetado para ajudar no desenvolvimento da ISO 26262 e Aplicações de segurança funcional IEC 61508. Este *LaunchPad* apresenta opções de conectividade, como *Ethernet* PHY DP83630 e sincronização de medição pelo protocolo *IEEE 1588*, *Precision Time Protocol (PTP)* que, é uma das funcionalidades mais importantes para implementação da plataforma proposta pois, é o *PTP* quem irá garantir a sincronização dos vários sensores em rede permitindo compreender a variabilidade da radiação solar em uma área determinada. Além disso, o Hércules possui 4 MB de memória flash integrado, 512 kB de RAM de dados de bit único, opera com frequência de *clock* de até 330 MHz, possui dois conversores ADC de 12 *bits* e temporizadores *High-End* programáveis. A Fig. 1 apresenta o DAQ a ser usado.



Figura 1 - Hardware de medição e transmissão de dados.

2.2 Sensor e transdutor

Para o projeto de experimento (Plataforma) proposto, os sensores/transdutores a serem utilizados neste sistema, serão células de referências de tecnologia de silício cristalino. Estas podem ser substituídas aos piranômetros, que são os equipamentos padrões de medição do recurso solar. Estudo realizado pelo (NREL, 2012), demonstram que as células de referência possuem boa resposta espectral podendo ser usadas na avaliação de desempenho de sistemas fotovoltaicos (FV). Em seu trabalho Wilbert *et al.* (2018), classificam células de referências e alguns modelos de piranômetros na

mesma categoria ISO 9060:2018 para erros espectrais em condições de céu claro. Para este trabalho, será utilizada a célula de referência apresentada na Fig. 2, cujas características são descritas na Tab. 1.

Tabela 1 - Especificação técnica da célula de referência. Fonte: Atonometrics.

PARÂMETRO	VALOR
Célula fotovoltaica	20 mm x 20 mm, ~135 mA @ 1 sol
Faixa de medição de irradiância	0 a 1500 W/m ²
Temperatura de operação	-35°C a 80°C
Opções analógicas de sinal de saída	0 a 1,5 V; 0 a 10 V; 4-20 mA
Tempo de resposta	0.15 s
Não linearidade	+/- 0,03% do range
Incerteza geral de medição	+/- 2,0% da leitura +/- 4 W/m ²



Figura 2 - Célula de referência. Fonte: Atonometrics

2.3 Condicionamento de sinais

No processo de medição, monitoramento, aquisição e transmissão de dados, quase sempre ocorre que o valor de saída do sinal do sensor/transdutor seja menor ou maior que os valores suportados pela entrada do conversor analógico digital (*Analog Digital Converter* – ADC). Assim, torna-se necessário o uso de circuitos *offset* amplificadores operacionais para elevar ou reduzir estes valores para que sejam compatíveis com o conversor ADC.

2.4 Conversor ADC

No processo de medição, aquisição e transmissão de dados, em geral, tem-se o processo pelo qual um fenômeno físico real, percebido por um sensor e/ou transdutor é transformado num sinal elétrico analógico proporcional e convertido num formato digital para posterior visualização, armazenamento, processamento e análise.

O sinal em sua forma analógica é contínuo, então em cada intervalo de tempo do sinal analógico existem infinitos valores de tensão e/ou corrente, o que torna impossível converter todos os valores do sinal para a forma digital. Desta forma, tem-se um novo sinal descontínuo obtido a partir destas amostras, e estes sinais são discretizados provenientes do sinal de origem (Oppenheim e Willsky, 2010). De tal forma, é preciso estabelecer qual informação é necessária e qual pode ser descartada. A perda de informação neste processo se dá devido, principalmente, ao intervalo entre os instantes definidos para amostragem do sinal e ao passo de quantização. Este processo é feito pelo conversor ADC, que neste caso, é integrado ao kit programável usado neste projeto de experimento (Plataforma).

2.4.1 Número de amostras

Este parâmetro será definido como escolha de projeto visando garantir uma população de amostras suficiente para a realização do processamento de sinais. Tendo em vista que a medição e monitoração junto a aquisição de dados será em tempo real, ou seja, o *hardware* receberá uma especificação temporal para que se façam as medidas do elemento sensor, que serão sincronizadas para todos os pontos de aquisição, que irá fornecer um sinal diretamente proporcional à variação da radiação solar incidente. Como este sinal será variável ao longo do dia para todos os instantes de tempo, o *hardware* será programável para que a coleta de dados seja feita pelo menos a cada 1 segundo. Assim, para o período de 24 h podem ser coletadas até 86.400 amostras, porém, como o período de interesse é durante o dia solar, será considerado o intervalo de tempo de início e fim das medições entre 6h e 18h, portanto, o número de amostras se reduz à metade.

2.4.2 Taxa de amostragem

O Teorema da Amostragem proposto por Shannon ou Teorema de Nyquist (Oppenheim e Willsky, 2010), afirma que um sinal contínuo é amostrado propriamente, podendo ser, posteriormente, recuperado como o sinal analógico a partir do sinal amostrado, apenas se o sinal original não conter frequências acima da metade da razão de amostragem.

A amostragem trata-se do processo pelo qual são armazenados os valores do sinal contínuo apenas em instantes discretos de tempo. Na prática, o sinal analógico passa por um *Sample & Hold*, ou seja, que “segura” (*Hold*) a potência instantânea por um tempo para que o quantizador possa medir o valor da amostra. O conversor especificado junto ao *hardware* possui taxa de amostragem de 30 KPS, ou seja, 30 mil amostras por segundo. Neste aspecto é importante garantir que o conversor tenha o maior número de *bits*, assim quanto maior o número de *bits* utilizados para a conversão na forma digital, maior será o número de valores analógicos a serem discretizados.

2.4.3 Limites dos valores de entrada

Os valores deste parâmetro são definidos segundo as características do sensor a ser utilizado. São valores de fundamental importância uma vez que garantem a máxima resolução a que o sistema de aquisição pode atingir. Segundo os dados de catálogo do sensor, a potência elétrica instantânea de saída pode ser ajustada proporcionalmente à radiação sendo a potência mínima nula. Contudo, estes valores estão atrelados aos limites de tensão e corrente a serem entregues pelo sensor para cada radiação solar instantânea. Para o sensor especificado neste trabalho, a faixa de valores de entrada pode ser de 0 a 10 V ou 4 a 20 mA.

2.4.4 Resolução

Nesta etapa, é preciso garantir a mínima mudança na potência necessária para garantir uma alteração no nível de código de saída, essa mudança é denominada de *bit* menos significativo de sinal, *LSB*, do inglês *Least Significant Bit*. A resolução é especificada pelo número de bits do conversor, que no kit em questão deste trabalho pode ser configurado em até 12 bits, o que nos permite codificar um valor de entrada analógica para um em 2^{12} níveis diferentes. A Eq. (1) demonstra o cálculo da resolução de forma resumida (Texas, 2015).

$$R = \frac{E_{FSR}}{N} \quad (1)$$

Onde o E_{FSR} é a escala da faixa de tensão e N é o número de intervalos de tensão, dado por 2^M , em que M é o número de bits do ADC.

3. REDE DE SENSORES DISTRIBUÍDOS E SINCRONIZAÇÃO DA MEDIÇÃO

A proposta de projeto (Plataforma), diz respeito a um sistema de telemetria, mais particularmente, a um sistema de telemetria entre sensores distribuídos, ou seja, uma plataforma em que sensores distribuídos espacialmente em área predefinida para medição da radiação solar, mensuram, coletam e transmitem tais dados no mesmo instante de tempo.

Esta rede de sensores, que a priori, será composta de pelo menos 6 pontos de medição (6 células de referência), não contará com nó central de coleta e transmissão de dados, ou seja, cada ponto de medição será também um ponto de transmissão dos dados uma vez que o *hardware* do DAQ comporta ambas as funções.

Como a medição e transmissão será sincronizada e feita ponto a ponto, será possível garantir, significativamente, um aumento elevado da transmissão de dados do que o previamente possível, mantendo o tempo preciso de sincronização entre sensores.

3.1 Métodos e medição para caracterização de relógio

Um relógio ideal possui um erro em cada medição de frequência, e, este é aleatório e não correlacionado com nenhum dos erros anteriores. Por outro lado, como a hora de um relógio resulta da adição ou integração da frequência de um oscilador, os erros de hora também são integrados. O erro de tempo, $X(t)$, para cada relógio adiciona todos os erros de frequência independentes. O $X(t)$ segue o chamado processo de passeio aleatório. O erro de tempo, em qualquer ponto do tempo, se correlaciona com o passado, porque é um acúmulo de todos os erros anteriores. Por causa do fenômeno da caminhada aleatória, o desvio padrão do erro de tempo de um relógio também é ilimitado no caso ideal. Contudo, para frequência do oscilador, a partida da frequência é definida como a derivada normalizada da frequência, como mostra a Eq. (2) do trabalho de (Flammini e Ferrari, 2010).

$$y(t) = \frac{dv}{v} \quad (2)$$

Onde ν é a frequência do oscilador.

O erro de tempo $x(t)$ pode ser expresso em função do seu deslocamento de frequência conforme Eq. (3):

$$x(t) = \int_0^t y(t') dt' \quad (3)$$

Nos osciladores de precisão, frequentemente ocorrem desvios de frequência, erros sistemáticos típicos. O desvio de frequência ocorre, por exemplo, em todos os osciladores de cristal. O erro de tempo causado pelo desvio de frequência é dado pela Eq. (4).

$$\frac{1}{2} D t^2 \quad (4)$$

Onde t é o tempo desde que o relógio é sincronizado e sintonizado, e $D=y(t)/t$ é a quantidade de desvio da frequência. Esse erro de tempo é chamado de erro de intervalo de tempo (TIE). O desvio de frequência afeta as medidas anteriores com a seguinte relação apresentada na Eq. (5).

$$\sigma_y(t) = Mod. \sigma_y(\tau) = \frac{D\tau}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Em que σ_y é a estimativa de variância e τ é a média dos intervalos de tempo. Assim, o erro de intervalo de tempo em uma rede pode ser ajustado variando o intervalo de sincronização.

3.2 Sincronização de relógios para sistemas distribuídos em tempo real

Os relógios de dispositivos de sistemas de aquisição de dados distribuídos, podem diferir após um certo período de tempo, mesmo que sejam inicialmente definidos com alguma precisão. Isto em razão ao desvio da taxa (derivada) da frequência de *clock* dos osciladores locais e outras perturbações ambientais. Em seu trabalho (Flammini e Ferrari, 2010) descrevem de forma detalhada uma aplicação de algoritmo de sincronização a sistema de medição distribuídos e em tempo real. Nesta aplicação, é possível compensar o tempo de erro, contudo, duas fontes de erro ainda permanecem no sistema: as informações sobre a hora de relógio devido aos desvios e a incerteza do atraso das mensagens durante o percurso que estas levam para trafegar na rede distribuída. O desvio do relógio, geralmente, é mais influente do que o atraso da mensagem, caso o atraso de comunicação seja pouco frequente; com a diminuição da frequência de comunicação, a incerteza devido ao desvio do relógio aumenta, enquanto a incerteza devido aos atrasos das mensagens permanece constante.

Uma solução trivial pode ser a diminuição do intervalo de sincronização, mas quaisquer esquemas de sincronização de relógio exigem que as informações de tempo obtidas através da comunicação sejam processadas. Assim, o esforço computacional e a memória exigida pelos algoritmos de sincronização devem aumentar com o aumento das trocas de dados de comunicação. Isso significa que uma troca entre o esforço computacional e a precisão deve ser alcançada.

Ainda segundo o trabalho de (Flammini e Ferrari, 2010), a sincronização pode ter um escopo global se, a sincronização do relógio for necessária em todos os nós da rede, ou ter um escopo limitado, se for necessária apenas em um subconjunto de nós. Existem algoritmos nos quais os nós da rede trocam mensagens de sincronização sem interrupção e a sincronização do tempo é contínua. Do contrário, outros aplicativos requerem "sincronização sob demanda"; se nenhuma sincronização for necessária, a comunicação poderá ser reduzida. Existem dois tipos de sincronização sob demanda:

- Sincronização sob demanda acionada por evento, usada quando um nó precisa de um relógio sincronizado somente imediatamente após o evento;
- Sincronização sob demanda acionada por tempo, usada para coletar dados de vários nós em um determinado momento. Como não há evento de disparo, os nós da rede precisam ser sincronizados em um determinado momento e manter a sincronização pelo menos até que a aquisição de dados ocorra. Esse comportamento pode ser obtido usando a "sincronização imediata", onde os nós recebem o comando para coletar uma amostra e marcar a data e hora, ou a "sincronização antecipada", onde a ordem de amostra é realizada em um momento futuro.

A sincronização antecipada é obrigatória quando a transferência de comando e tempo não puder ser simultânea a todos os nós envolvidos. Observa-se que a precisão mínima de sincronização exigida pela sincronização antecipada está relacionada ao tempo decorrido entre o instante de sincronização e o evento programado. Um bom algoritmo de sincronização para sistemas de aquisição de dados deve estimar a taxa de *clock* (sintonização, conforme explicado anteriormente) e o deslocamento a partir do tempo de referência. A estimativa de deslocamento é suficiente para operações de fusão de dados, enquanto a sintonização é necessária se os intervalos de tempo tiverem que ser medidos.

Por fim, a sincronização de tempo pode ser alcançada de duas maneiras distintas. Os relógios podem ser forçados a ter o mesmo horário a qualquer momento, ou, cada relógio possui seu próprio horário, mas pode transformar a escala de tempo dos outros relógios. Resultados iguais podem ser obtidos usando as duas abordagens: a primeira abordagem requer

a mesma quantidade de comunicação na rede, enquanto a última exige uma enorme sobrecarga computacional e de memória. As informações de tempo são trocadas entre relógios, especificando um instante ou intervalos de horário; informações adicionais sobre a qualidade da sincronização (incerteza de tempo) também podem ser fornecidas.

3.3 Sincronização de relógios em redes comutadas por pacote

Ao longo dos anos, várias soluções foram propostas para sincronizar os desvios de relógios locais em sistemas distribuídos: alguns usando *hardware* dedicado, como os receptores GPS (*Global Position System*), o que compensaria o desvio local. Contudo, tais abordagens exigem uma rede separada para distribuição de tempo, o que significa custos extras e reduzida confiabilidade de todo o sistema. As soluções de sincronização de *clock* mais atraentes para o sistema de aquisição dos dados distribuídos, são os algoritmos que também podem ser usados em redes comutadas por pacote, como a *Ethernet*.

Para tais aplicações, os protocolos de comunicação mais difundidos são o *NTP*, *Network Time Protocol* (IETF RFC 1305, 1992) e o *PTP*, *Precision Time Protocol* (IEEE 1588 V2, 2008). Ambas as soluções têm vantagens e desvantagens nas aplicações de aquisição de dados que devem ser balanceadas pela análise das solicitações de *hardware* (tempo de desempenho) e restrições (custo e tempo de desenvolvimento). Em algumas aplicações, a precisão de sincronização solicitada é inferior a 1 μ s. Em tais situações, o sistema de referência de hiper desempenho com o qual as outras soluções são comparadas é o uso de um receptor GPS para cada dispositivo a ser sincronizado. O GPS pode garantir um alto nível de precisão, mas tem a desvantagem do cabeamento e colocação de antenas (especialmente em um ambiente industrial ou com aplicação interna). Por outro lado, o uso da mesma rede que conecta os dispositivos e transporta os dados do processo, transmitindo as informações de tempo, é a solução mais inteligente (Giorgi e Narduzzi, 2009).

O *PTP* é um protocolo de sincronização de tempo desenvolvido para sistemas de medição e controle distribuídos. Ele foi projetado para fornecer sincronização com sistemas que exigem uma precisão maior que o *NTP*. Este protocolo permite obter uma precisão de microssegundos se:

- a estabilidade e a precisão do oscilador devem ser tais que um segundo medido por qualquer um dos relógios esteja dentro de $\pm 0,01\%$ do segundo (SI);
- os registros de data e hora devem ser tomados o mais próximo possível do *hardware*;
- a rede deve suportar transmissão *multicast*;
- os caminhos de comunicação devem ser simétricos;

No *PTP*, a sincronização é feita de forma externa, em que todos os relógios da rede são sincronizados com a hora de um único relógio, o relógio *grandmaster*. Nesta topologia, tem-se uma sub rede com relógios atuando no sistema mestre-escravo. Assim, a sincronização é alcançada por meio de duas etapas: primeiro, os relógios na rede são organizados em uma hierarquia de mestre-escravos e, em seguida, os nós começam a trocar mensagens com registro de data e hora entre os relógios mestre e escravo.

Em particular, o *PTP* - IEEE 1588 (2008), suporta arquitetura tolerante a falhas que é necessária para garantir que nenhuma falha de elemento de rede único possa causar falha de *clock* na sincronização. Em um sistema com *grandmaster* redundantes, este deve ser capaz de detectar falhas do primeiro *grandmaster* e os relógios comuns devem poder mudar de um *grandmaster* para outro sem incorrer em uma frequência inaceitável ou saltos de fase. A tolerância a falhas é crítica em aplicativos de telecomunicações e em muitos *hardwares* de aquisição de dados, onde segurança e confiabilidade são necessárias.

4. PROPOSTA DE EXECUÇÃO DO SISTEMA

O sistema proposto a fazer a medição, monitoração, aquisição e transmissão dos dados solarimétricos distribuídos espacialmente e com alta resolução temporal é composto por uma rede sensores conectados à dispositivos de aquisição de dados (DAQ) programados para registrar dados simultaneamente em locais distintos. A plataforma proposta deve registrar sinais de entrada físicos usando a mesma referência de registro de data e hora, por exemplo, se um evento faz com que os sinais de dois pontos de mediação sejam alterados, o sistema proposto pode medir o atraso entre a mudança efetiva das entradas. A priori, pretende-se fazer a instalação de no mínimo 6 pontos de medição distribuídos.

O registro dos dados mensurados será feito por transmissão via rede *Ethernet* a uma estação de aquisição de dados do tipo servidor *on-line* em conjunto com um registrador de tempo. A rede, a ser criada para transmitir os dados chamada “rede de registro de dados”, será implementada de forma a garantir e transmitir, além da informação do sensor de dados, o registro de data e hora da ocorrência do evento. Desta forma, será necessária uma sincronização estrita do relógio entre análises para comparar os registros de data e hora de diferentes registros. Para o sistema de medição proposto, a sincronização da rede será feita com base no protocolo *PTP IEEE1588*, que será distribuído pela rede de registro de dados como descrito no trabalho de (Giorgi e Narduzzi, 2009).

Uma parte importante da aplicação, será a arquitetura de integração dos sistemas de aquisição e transmissão e o servidor de onde os dados serão armazenados para posterior tratamento analítico. Nesta estrutura, será criada uma interface de banco de dados dentro do próprio servidor. Optou-se por usar o *MySQL*, que é um gerenciador de banco de dados relacional de código aberto. O serviço utiliza a linguagem *SQL*, *Structure Query Language*, que é uma linguagem consolidada para inserir, acessar e gerenciar conteúdo em banco de dados. Na aplicação proposta, pretende-se fazer a aquisição de dados de irradiância – W/m^2 . Como os sensores em questão são células de referências, estas já convertem a

irradiância proporcional em um sinal de corrente. Assim, dentro da configuração da plataforma *Web* serão exibidas tabelas dinâmicas para posterior análise estatística dos dados. O *back-end* será feito em linguagem de programação *PHYTON*, onde, o kit operacional da *Texas Instruments*© irá fornecer os dados via banco de dados.

Através dos dados fornecidos será gerado uma API, do inglês, *Application Programming Interface*, que é um *link* que fornece dados via parâmetros em formato JSON ou XML para integração. Por meio da API, será feita a integração com a plataforma *web* para exibição dos dados coletados, o que permite que os dados sejam consultados de qualquer lugar uma vez que se tenha o *link* da plataforma. A Fig. 3 mostra um esquema simplificado da execução do protótipo.

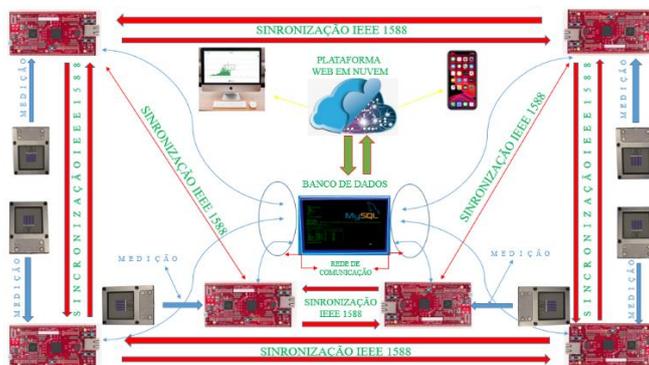


Figura 3 - Esquema de implantação do sistema medição e aquisição de dados sincronizados.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Na execução deste trabalho com fulcro na aplicação do protocolo de *PTP*, será aproveitada a estrutura de sincronização por meio deste protocolo que foi utilizada no trabalho desenvolvido por (Junior, 2014) para sincronização de medidas de qualidade da energia. De tal forma, são apresentadas a simulação e resultados deste trabalho que visam alcançar o sucesso da sincronização das medições do sistema proposto neste *paper*.

A base funcional do *PTP*, é a hierarquia mestre-escravo em que mensagens entre mestre e escravo são trocadas de forma que, através de informações temporais os escravos ajustem seus relógios ao ponto mestre. Na Fig. 4, são apresentados os perfis de atrasos das mensagens entre mestre e escravo de forma a ser definido o *offset*, que é a diferença entre a referência temporal do escravo e do mestre. Isto implica que se o *offset* for positivo, então a referência temporal do escravo está adiantada em relação ao mestre. Ao passo que, de outra forma se o *offset* for negativo, significa que o escravo está atrasado em relação ao mestre. Em seu trabalho (Junior, 2014) descreve as equações dos atrasos conforme as equações Eq. (6) e Eq. (7).

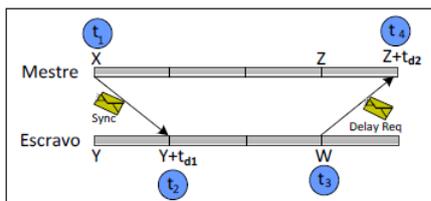


Figura 4 - Modelo simplificado da troca de mensagens no *PTP*. Fonte (Junior, 2014).

$$t_2 - t_1 = (Y + t_{d1}) - X = (Y - X) + t_{d1} = \text{offset} + t_{d1} \quad (6)$$

$$t_4 - t_3 = (Z + t_{d2}) - W = (W - Z) + t_{d2} = -\text{offset} + t_{d2} \quad (7)$$

Se os atrasos vierem a ser iguais, $t_{d1} = t_{d2} = t_d$. E se for subtraída a Eq. (7) da Eq. (6) chega-se à Eq. (8) para estimação do *offset*.

$$\text{offset} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad (8)$$

Nesta etapa, em geral o desempenho da sincronização pelo protocolo sugerido, requer recursos avançados de *hardware* para embutir o *timestamp* t_1 na mensagem *Sync* com boa precisão conforme *PTP* - IEEE 1588 (2008). Como forma de garantir um desempenho satisfatório mesmo utilizando-se de hardware comum, usa-se a estratégia de tomar nota do t_1 imediatamente depois do envio de *Sync*, e enviá-lo em uma mensagem subsequente de *Follow Up*. Contudo, a

estimação do *offset* com relação ao mestre, o escravo há de saber o valor do *timestamp* t_4 . Observando-se a Fig. 4 novamente, percebe-se que esta informação está disponível apenas para o mestre, o que requer seu envio ao escravo por meio de uma mensagem *Delay Resp* (Junior, 2014). A Fig. 5 apresenta o esquema definitivo para troca de mensagens do PTP.

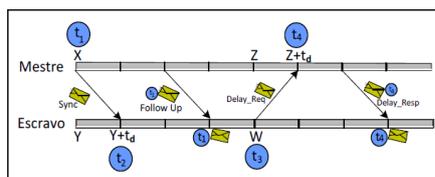


Figura 5 - Modelo Completo da troca de mensagens no PTP. Fonte (Junior, 2014)

5.1 Testes de sincronização

Nesta etapa do desenvolvimento, conta-se apenas com verificação de funcionamento efetivo da aplicação do PTP, de forma que as medições efetivas do recurso solar somente serão feitas depois de toda a estrutura ser finalizada. Em seu trabalho (Junior, 2014) realizou testes: iniciais, de validação e aplicação. Neste trabalho apresentam-se os resultados de tais testes à exceção do teste de aplicação, uma vez que a estrutura de medição do recurso solar ainda se encontra em desenvolvimento.

Nos respectivos testes, inicial e de validação, buscou-se a verificação do bom funcionamento do *software* desenvolvido na plataforma *LabVIEW* para aplicação do protocolo, e por meio de medidas de um sinal de teste aleatório foram sincronizadas medidas, validando a aplicação proposta do PTP. Em sua aplicação (Junior, 2014), considerou apenas os cenários tendo duas ou três entidades do PTP (um escravo ou dois escravos, acompanhados pelo mestre).

Na elaboração dos testes de funcionamento do protocolo, buscou-se caracterizar as aplicações ‘Mestre’ e ‘Escravo’ com relação à coerência dos valores das sucessivas estimativas de *offset*. Assim, num primeiro instante, considerando o cenário com apenas um escravo, seu *offset* com relação ao mestre foi estimado periodicamente a cada 300 ms, durante um intervalo de 20 minutos. A Fig. 6 ilustra como o *offset* se comportou durante a execução do teste. Cabe salientar que, foi feito um ajuste de zero de forma que o *offset* inicial fosse nulo (Junior, 2014).

Na análise do gráfico acima, percebe-se um comportamento linear do *offset* em função do tempo, para o qual a referência temporal do escravo se adianta de aproximadamente 1 ms, a cada minuto com relação à referência temporal do mestre. Esta análise infere a um bom funcionamento do protocolo de rede, o que permitiu avançar ao próximo passo que foi o de fazer a sincronização de referência temporal em um sistema de medição (Junior, 2014).

Em seu trabalho, (Junior, 2014) realiza a execução de medições de um sinal de teste configurado no *LabVIEW* em um computador secundário que não participa da rede à qual está inserido o PTP. Este sinal, constituído de uma senóide de 60Hz, cuja distorção harmônica total é teoricamente igual a zero, com um pulso de duração rápida (300 μ s), periódico de 100 ms, foi gerado por meio das saídas analógicas de tensão de uma placa *PCI 6014* conectada a este computador. Nesta etapa, o sinal de teste considerado é ilustrado na Fig. 7. Já a Fig. 8 apresenta o perfil de sincronização dos sinais com excelente precisão, uma vez que este sugere apenas a existência de um sinal no gráfico, quando que na verdade há dois sinais sobrepostos pela sincronização.

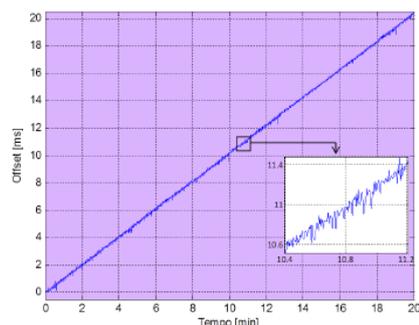


Figura 6 - Variação temporal do *offset* entre duas referências temporais diferentes. Fonte (Junior, 2014).

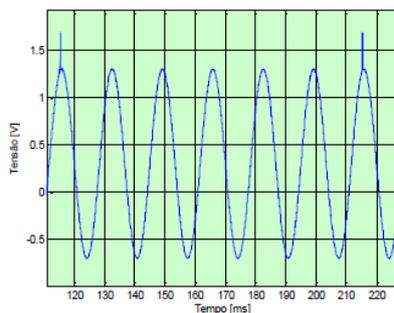


Figura 7 - Sinal customizado utilizado na validação do PTP implementado em software. Fonte (Junior, 2014).

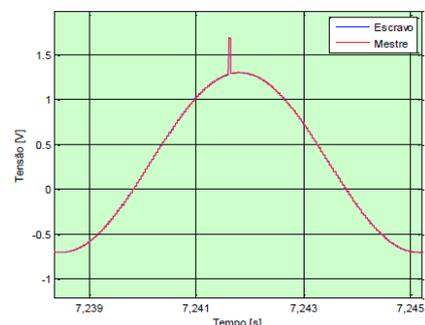


Figura 8 - Precisão de sincronização de medição. Fonte (Junior, 2014)

Conforme o trabalho de (Junior, 2014), o teste de validação consiste na execução periódica do seguinte procedimento: estimação de *offset* seguida de 12 ciclos de 60 Hz. Assim, o *offset* estimado, é usado pelos escravos para corrigir os *timestamp* da janela de medição que segue. Realizado o processamento de sinais via MATLAB considerando-se uma média de 20, 40, 60 e 80 estimativas de erro, obteve-se os melhores resultados para o maior número de estimativas conforme apresentados nas Fig.9, Fig. 10 e Tab. 2.

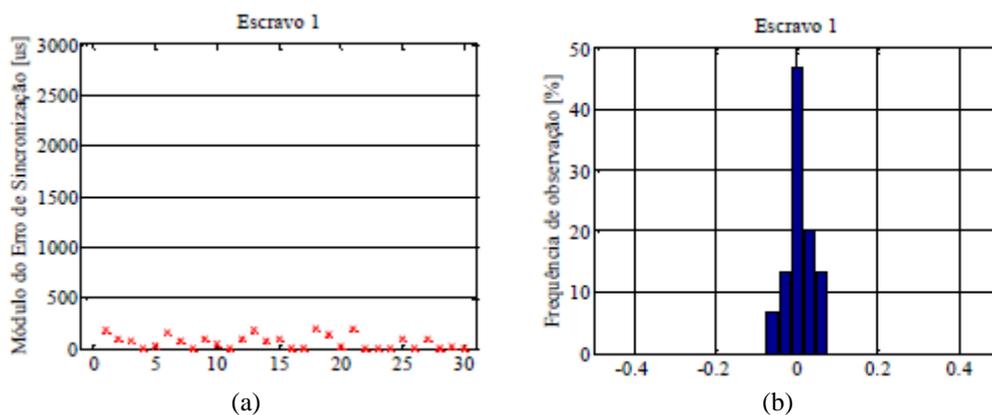


Figura 9 - Precisão de sincronização (a) e distribuição do erro (b). Fonte (Junior, 2014).

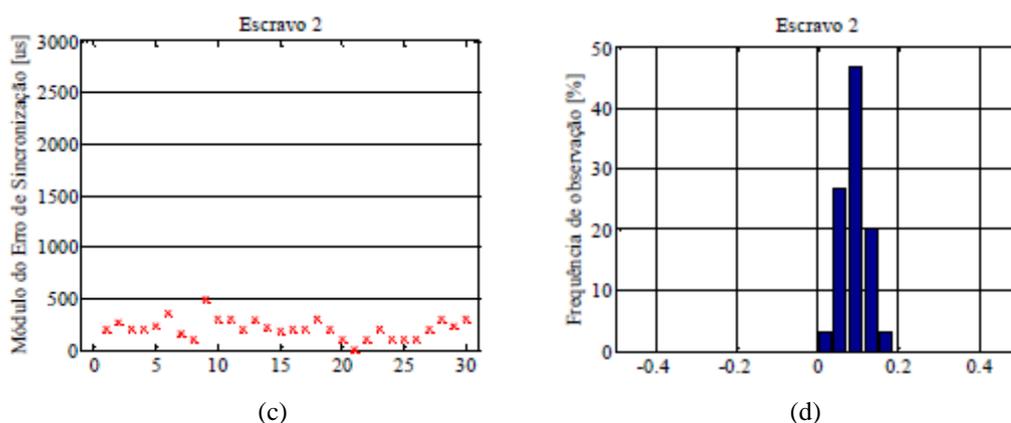


Figura 10 - Precisão de sincronização (c) distribuição do erro (d). Fonte (Junior, 2014).

Tabela 1: Dados estatísticos sobre o módulo do erro de sincronização. Fonte (Junior, 2014).

DADO	ESCRAVO 1	ESCRAVO 2
Mínimo	0,08 μs	0,07 μs
Máximo	200,11 μs	496,69 μs
Média	68,07 μs	210,95 μs
Desvio Padrão	69,43 μs	97,72 μs

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se uma proposta de desenvolvimento de plataforma de medição, monitoração, e transmissão de dados solarimétricos distribuídos espacialmente e com alta resolução temporal. A proposta de desenvolvimento deste trabalho faz parte do estudo de monitoramento da radiação solar para aplicação de modelos de previsão da radiação solar.

Na proposta referida, foram apresentadas as metodologias de desenvolvimento que contam com a escolha de toda a arquitetura de rede, protocolos de sincronização, servidor banco de dados e o item chave que possibilitará toda execução desta plataforma, que é o *kit* de desenvolvimento, aquisição e transmissão de dados. Foram apresentadas também as simulações de testes do protocolo de sincronização de medição que será aproveitado de outro trabalho desenvolvido na Escola de Engenharia da UFMG e que vai servir como base para a implementação do desta plataforma.

Nas simulações de estimativas de erro de *offset* apresentadas pelo trabalho de (Junior, 2014) a serem utilizadas para execução da sincronização de medições da plataforma sugerida neste trabalho, observou-se que o protocolo obteve um bom desempenho e o erro de sincronização médio do escravo 1 e escravo 2 giraram na ordem de 68,07 μs e 210,95 μs , o que representa respectivamente 0,41% e 1,27% de um cliço do sinal medido e com erro máximo da ordem de 496,69 μs .

Quando da execução do sistema de monitoramento do recurso solar de forma distribuída e sincronizada com alta resolução temporal utilizando-se o *PTP*, *Precision Time Protocol IEEE 1588*, espera-se um mínimo desvio em relação aos erros de medição a serem realizados nos pontos de medição. Isto torna-se viável em razão da aplicação do protocolo

de sincronização de medição que permite erro máximo entre sinais na ordem de μs e com análise de desvio padrão podendo serem quantificadas na ordem de ns. Estes valores serão independentes do tráfego da rede de aquisição de dados, contudo, é preciso uma análise experimental para escolha do interruptor do período de sincronização.

Espera-se que ao final do desenvolvimento da plataforma, obtenha-se um primeiro protótipo em funcionamento de estação solarimétrica de dados distribuídos espacialmente com excelente resolução temporal, o que vai possibilitar uma melhor análise envolvendo o recurso solar nas suas várias frentes de pesquisa.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelas agências ANEEL / CEMIG – Projeto de P&D – D 0722, CNPq, CAPES, FAPEMIG e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais – PPGEE-UFMG.

REFERÊNCIAS

- Balan, M., Damian, M., Jantshi, L., 2008. Preliminary results on design and implementation of a solar radiation monitoring system. *Sensors* 8, pp. 963-978.
- Belmili, H., Cheikh, S., Haddadi, M., Larbes, C., 2010. Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization. *Renewable Energy* 35, pp. 1484-1492.
- Dazhi, Y., Zhen, Y., Li, H.I.L., Zibo, D., 2015. Very Short Term Irradiance Forecasting Using the Lasso. *Solar Energy* 114, pp. 314-326.
- Flammini, A., Ferrari, P., 2010. Clock Synchronization of Distributed, Real-Time, Industrial Data Acquisition Systems. DOI: 10.5772/10458.
- Giorgi G., Narduzzi C., 2009. Performance analysis of Kalman filter-based clock synchronization in IEEE 1588 networks. In Proc. of IEEE Int. Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS09), Brescia, Italy, pp. 6-12 Oct. 2009.
- IEEE std.1588, 2008. Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. IEEE Instrumentation & Measurement Society.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso (30/11/2019).
- Junior, P.A.A., 2014. Medições de Qualidade da Energia Elétrica Sincronizadas Via IEEE 1588. Monografia, EEUFMG.
- Oppenheim, Alan V., Willsky, Alan S., 2010. Sinais e Sistemas, Pearson.
- NREL – National Renewable Energy Laboratory, 2012. Pyranometers and Reference Cells, What's Difference? PV Magazine 2012.
- Pereira et al., 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar (INPE - 2ª edição – 2017). Projeto Sonda / INPE <http://sonda.ccst.inpe.br/infos/variaveis.html> (Acesso 30/11/2019).
- Silva, M. V., 2017. Esquemas de Quantização do Demodulador para Comunicação Óptica pelo Espaço Livre. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Campinas.
- Texas Instruments, 2015. User Guide Principles of Data Acquisition and Conversion.
- Wilbert, S., Jessen, W., Forstinger, A., Driesse, A., Habte, A., Sengupta, M., Vignola, F., Zarzalejo, L.F., 2018. Application of the Clear Sky Spectral Error for Radiometer Classification in ISO 9060. Solar World Congress 2019, Santiago Chile.

PLATFORM PROPOSAL FOR MONITORING SYNCHRONIZED SOLARIMETRIC DATA WITH HIGH TEMPORAL RESOLUTION

Abstract. *This article presents a proposal for a system for measuring, monitoring and transmitting solarimetric data in high temporal resolution and spatially distributed. This platform aims to implement a solarimetric station, whose developed system will allow the acquisition of solarimetric data with transmission via Ethernet network and in real time synchronized using the PTP protocol (Precision Time Protocol) of the IEEE 1588 standard, thus ensuring that all measurements distributed sensors are carried out at the same time. The data will be stored on an online MYSQL server and can be consulted from any location as long as the link to the web platform for sampling is accessed. The architecture will be implemented using standard hardware components, basic Ethernet network structure and an x86 / x64 architecture without any specialized operating system. The referenced simulations that will serve as the basis for this work, showed good synchronization accuracy with a variable mean error of 68.07 μs and 210.95 μs between measurement points. Considering all deviations in the acquisition frequency and maximum error in the order of 496.69 μs , PTP is sufficiently effective for the acquisition proposal in real time, synchronized with high temporal resolution.*

Keywords: *Solar Resource, Distributed Monitoring and Measurement, IEEE 1588 PTP Protocol.*