

INTRODUÇÃO AO SMART GRID

MATEUS M. COELHO, SÉRGIO CORDEIRO, ALAN OLIVEIRA

SMART GRID E SUAS APLICAÇÕES

Introdução. Ao longo dos últimos anos várias empresas de energia do Brasil começaram a investir em uma área pouco explorada por aqui que é a instalação das smart grids ou seja redes inteligentes de energia elétrica. Esta ação muda de maneira radical a forma que cada um lida com a energia que ilumina sua casa. Com o uso do medidor inteligente e os recursos tecnológicos a ele associado é possível monitorar o consumo de um cliente em tempo real.

Trata-se de um avanço sem precedentes para as concessionárias de energia pois incursões nesta seara estavam sendo conduzidas de maneiras em modestas. Alguns benefícios proporcionados pela smart grid são a identificação de fraudes no consumo por parte dos clientes, monitoramento de energia em tempo real onde qualquer falta virá à tona com maior agilidade.

Esta tecnologia tende a beneficiar não somente as empresas, mas também trará benefícios aos consumidores, pois reparos, religamentos poderão ser realizados com mais velocidade e de maneira remota. A adoção da smart grid além de trazer benefícios ao meio ambiente em função do incentivo do uso racional de energia, permitirá a geração de energia distribuída, ou o uso das casas dos consumidores em pequena escala, com a instalação de painéis solares e micro geradores eólicos. Cada consumidor se transformará assim em uma mini usina de energia. No Brasil a geração distribuída ainda não é uma realidade; com a smart grid há agora a expectativa que ela possa decolar num futuro menos remoto.

Se tratando do sistema elétrico, que está cada vez mais sobrecarregado e enfrentando apagões por todo o mundo, surge através do advento da smart grid a aplicação da medição fasorial sincronizada.

O Sistema de Medição Fasorial Sincronizada se apresenta como uma “nova” tecnologia com o intuito de aprimorar a operação e a supervisão dos sistemas elétricos de todo o mundo pois permite medir, simultaneamente, magnitudes e ângulos de tensão e corrente, frequências, harmônicos, potência ativa e reativa, com rapidez, precisão e sincronismo em pontos geograficamente distantes do sistema elétrico. Seu principal componente é a Unidade de Medição Fasorial (PMU), que é responsável por obter as medições dos dados do sistema, processá-los, e enviá-los ao Concentrador de Dados, que ao receber os sincrofasores (de forma assíncrona),

deve formatá-los com etiquetas de tempo a fim de organizar conjuntos de medidas referentes ao mesmo instante de tempo e armazená-los numa base própria para atender a diversos tipos de aplicação.

Um sistema de medição fasorial é, basicamente, formado por:

- Unidade de medição fasorial (UMF) ? Ela é responsável por obter as medições dos dados do sistema, processá-las, e enviá-las ao concentrador de dados. Uma das características mais importantes da tecnologia de UMFs é que as medições são carimbadas com alta precisão na fonte, de modo que a velocidade de transmissão dos dados não é um parâmetro crítico para este sistema.
- Concentrador de dados fasoriais (CDF) ? Suas principais funções são: receber os sincrofasores (de forma assíncrona) coletados pelas diferentes UMFs, formatá-los com etiquetas de tempo a fim de organizar conjuntos de medidas referentes ao mesmo instante de tempo, armazená-los numa base própria e atender a diversos tipos de aplicação. Todo esse processo é realizado continuamente, gerando um fluxo de dados capaz de representar o estado do sistema elétrico de uma forma bastante próxima a do tempo real. Por isso ele requer um alto desempenho computacional, alto grau de confiabilidade e disponibilidade.
- Global Positioning System (GPS) ? Global Positioning System, comumente conhecido como GPS, é um sistema composto por diversos satélites, cuja principal função é auxiliar instrumentos de navegação fornecendo dados relativos às coordenadas de posição.
- Canais de comunicação ? Os canais de comunicação têm como função básica transferir os dados aquisitados entre as UMFs e o CDF, como também viabilizam a troca de informações entre Concentradores de Dados de diferentes áreas de controle. A tecnologia usada nestas interligações entre equipamentos pode ser desde linhas telefônicas até via wireless ou cabos de fibra óptica. A escolha varia de acordo com a aplicação e custo.

O sistema de medição fasorial sincronizado pode trazer um ganho significativo quanto ao conhecimento prévio do comportamento do sistema elétrico, já que esta medição através dos sincrofasores será mais exata, rápida e confiável. Esta inovação impacta positivamente a supervisão e controle do sistema, abrindo um campo para novas investigações e aplicações quanto ao planejamento e operação em tempo real.

O procedimento de medição fasorial pode ser dividido em três ou quatro etapas sendo: Filtragem do sinal de amostragem, aquisição dos dados via GPS, tratamento e formatação das medidas.

Atualmente, o sistema de medição utilizado é implementado com base de dados provenientes de um conjunto de telemidas redundantes, digitais e analógicas, que compõe o sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Estes

dados, obtidos em intervalos regulares de tempo, são recebidos e processados através de ferramentas computacionais chamadas Configurator de Rede e Estimador de Estado, para que se conheça a configuração do sistema e o perfil das tensões complexas nas barras. O Configurator de Redes tem como objetivo determinar a topologia atual da rede supervisionada para posterior utilização pelas demais funções do sistema de análise de redes.

Por fim a medição fasorial sincronizada tem se tornado a técnica de medição preferida para sistemas de potência. Esta técnica permite a medição de tensão de sequência positiva, corrente, frequência local e taxa de variação de frequência, além disso, pode ser personalizada para medir harmônicos e grandezas de sequências zero e negativa, e todas estas medidas sincronizadas para um mesmo microssegundo, isto é possível devido à disponibilidade do GPS e do avanço no desenvolvimento de técnicas de processamento de dados [Siemens 2015 3, Schweitzer 2015 3, CPFL 2015, ABB 2015 2, Abril 2015 1, Abril 2015 2].

WAHM. Como exemplo de aplicação, escolhemos apresentar a WAHM (*Wide Area Harmonics Monitoring*: Monitoração de Harmônicos para Grandes Áreas). O objetivo dessa aplicação é estimar o estado harmônico do sistema elétrico ¹. As técnicas empregadas são semelhantes às da estimação de estado na frequência fundamental ². A partir dessa estimativa, podem-se determinar as fontes e os sumidouros de harmônicos sob diversas condições operacionais. O operador do sistema pode, então, adotar medidas em tempo real para corrigir o excesso de harmônicos em um determinado ponto.

O excesso de harmônicos é prejudicial a diversos componentes do sistema, como, por exemplo, os capacitores *shunt*. A localização da origem do problema é difícil, uma vez que os harmônicos podem sofrer amplificação em pontos distantes da origem real, dependendo dos parâmetros das linhas de transmissão.

São requisitos para implementação da função WHAM:

- Devem existir PMUs em todos os barramentos que sejam potenciais fontes ou ralos de harmônicos ³.
- Medição até o 15º harmônico de fasor de tensão e do fasor de corrente.
- Taxa mínima de aquisição de dados: 1 amostra/s.
- Latência máxima para disponibilização dos dados: alguns segundos.

Atualmente, os operadores do sistema não têm qualquer visibilidade do estado harmônico de um sistema em tempo real. Os sistemas EMS e SCADA não são capazes de fornecer essa funcionalidade, por não atenderem aos requisitos listados [Zhou et. al. 2007 1].

¹HSE: *Harmonic State Estimation*.

²Para um sumário dessas técnicas, ver [Arumugam et. ali. 2011].

³Ou seja, a mera observabilidade não é suficiente.

EMPRESAS BRASILEIRAS QUE JÁ POSSUEM PMUs E PDCs

1) **CTEEP**

- Aplicação em monitoramento dinâmico (em tempo real) de 4 linhas de transmissão de 440kV.
- Quantidade de equipamentos instalados: 5 PMUs (SEs Ilha Solteira, Bauru, Cabreúva, Bom Jardim) e 1 PDC (SE Bom Jardim)

2) **FURNAS**

- Aplicação no monitoramento em tempo real dos sistemas de transmissão de 765 kV.

Obs: sem informação sobre a quantidade de equipamentos instalados.

3) **ITAIPU**

- Aplicação em validação de parâmetros de modelos dinâmicos de unidades geradoras.

Obs: sem informação sobre a quantidade de equipamentos instalados.

4) **ELETROSUL**

- Aplicação no monitoramento em tempo real dos sistemas de transmissão.
- Participa do projeto Medfasee com 3 PMUs instaladas em 4 subestações para monitorar linhas de 500KV em 4 subestações: SEs Ivaiporã, Areia, Campos Novos, Nova Santa Rita.

5) **CEMIG**

- Aplicação no monitoramento em tempo real dos sistemas de transmissão de 230 e 345kV.
- São 12 PMUs instaladas em várias subestações e 1 PDC instalado no COS (Centro de Operação do Sistema).
- Atualmente envia somente os dados de JAGUARA 345 kV para o ONS (por solicitação do próprio ONS).
- Aplicação já disponível além do monitoramento: Predição de nstabilidade de Tensão na barra da Subestação Taquaril.
- Outros equipamentos para medição de sincrofasores na Cemig:
 - 7 PMUs adquiridas através de projeto P&D, que porém não chegaram a ser instaladas (São Simão, Emborcação, Jaguará, Neves, Bom Despacho, Ouro Preto 2, Nova Ponte e Itumbiara)
 - 36 relés digitais com funções de PMU (linhas de 345 kV, SE Jaguará, SE Pimenta, SE Barbacena 2, SE Juiz de Fora 1, SE Lafaiete, SE Taquaril) que já estão instalados. Os dados destes relés ainda não são disponibilizados devido a restrições no sistema de telecomunicações entre o PDC e as subestações.

PAÍSES MAIS DESENVOLVIDOS NO TEMA

A tabela a seguir mostra, para cada região, quantas PMUs estão instaladas e quando a primeira PMU foi instalada, bem como a data e as fontes de informação consultadas.

Tabela 1: PMUs instaladas por sistema interligado

Região	PMUs instaladas	Referência ⁴	Instalação mais antiga ⁵
EUA e Canadá	1400	10/2014 [ORNL 2014]	1996 [BPA 2013]
China	≈ 2500	05/2013 [Tianshu 2013]	2002 [Tianshu 2013]
Europa Ocidental ⁶	> 100	01/2013 [de Vries 2013]	2001 [de Vries 2013]
Escandinávia	18	05/2012 [Hurtgen e Maun 2012]	⁷
Rússia	26	05/2012 [Hurtgen e Maun 2012]	⁷
Índia	23	05/2012 [Hurtgen e Maun 2012]	⁷
Brasil	61 ⁸	06/2007 [Zhou et. al. 2007 2]	⁷

A maneira mais segura de avaliar o avanço de cada sistema elétrico seria por meio do nível de não-observabilidade obtido. Essa informação, infelizmente, não foi encontrada, a não ser no caso do Brasil: segundo [Zhou et. al. 2007 2], com o número de PMUs indicado, o nível de não-observabilidade do sistema é 14.

⁴Fonte da informação e mês e ano da sua publicação.

⁵Ano de instalação da primeira PMU em ambiente de produção, e não em ambiente de testes.

⁶Área da UCTE (*Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity*). A tabela 2 apresenta um detalhamento por país.

⁷Informação não encontrada.

⁸O número de PMUs estimado para plena observabilidade é 425, e 299 adicionais seriam necessárias nas condições de contingência assumidas pelo ONS [Zhou et. al. 2007 2].

Tabela 2: Sites com PMUs instaladas em cada país (UCTE)
[Hurtgen e Maun 2012]

País	Sites
Espanha	13
França	5
Bélgica	1
Alemanha	3
Polônia	4
Suíça	5
Itália	19
Eslováquia	3
Hungria	4
Romênia	2
Bulgária	1
Grécia	1
Eslovênia	5
Áustria	2
Croácia	5

QUAIS SÃO OS FABRICANTES DE PMUs?

ABB. A ABB comercializa a PMU dedicada **RES670**, que é um IED da família Relion. Suas características são as seguintes:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 48 fasores (expansível até 64)
 - 48 de frequência, com taxa de mudança de frequência (expansível até 64)
- Portas adicionais:
 - 32 analógicas (expansível até 48)
 - 32 digitais (expansível até 48)
 - 8 alarmes
- Capacidade de comunicação:
 - até 2 *data streams*¹⁰ diferentes
 - até 240 frames por segundo em 60 Hz
 - até 8 conexões TCP e 6 UDP simultâneas
- Opções de formato para envio ao PDC:
 - 3 fasores independentes
 - 3 fasores de sequência (positiva, negativa e zero)
- Opções para sincronismo de tempo:
 - GPS
 - IRIG-B

- Compatibilidade:
 - IEEE C37.118-2011 e IEEE C37.118.1-2014, classes P e M
 - IEEE 1344
 - NERC CIP e IEC 62351-8 (cyber-security)
- Protocolos de comunicação:
 - IEC 61850-8-1 (station bus) e IEC 61850-9-2 (process bus)
 - DNP3.0
 - IEC 62439-3 (PRP)
 - IEC 608–5–103
- Funções de proteção e controle adicionais:
 - Alarmes de sobretensão e subtensão
 - Alarmes de sobrefrequência, subfrequência e taxa de mudança de frequência
 - Alarmes de sobrecorrente, sequência negativa direcional de corrente e subimpedância
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V, PF e f)
 - Alarmes de falta para terra, sobrecorrente, sobrepotência, subpotência, etc. (opcionais)
 - Lógica programável
 - Registro de eventos
- Precisão:
 - fasores: 0,5% em magnitude e 1,0 ° em ângulo de fase
 - sincronização: 1 μ s
 - frequência: 2.0 mHz
 - taxa de mudança de frequência: 10.0 mHz/s
- Não exige transdutores externos
- Os TCs e TP's internos devem ser escolhidos conforme a classe desejada (P ou M)
- Módulos extras de I/O da família Relion podem ser adicionados
- Possui filtro interno contra o 2º harmônico

O RES670 está disponível em dois modelos pre-configurados: A20 e B20 [ABB 2015 1, ABB 2014 1, ABB 2014 2].

Siemens. A Siemens não comercializa uma PMU dedicada, como é o caso da ABB, e sim disponibiliza a função de PMU em alguns relés de proteção da família Siprotec 5: 7SA84, 7SA86, 7SA87, 7SD84, 7SD86, 7SD87, 7SL86 e 7SL87, 7SJ82, 7SJ85, 7SJ86, 7SK85, 7SUT85, 7SUT86, 7SUT87, 6MD85, 6MD86, 7KE85

¹⁰*Data stream* é um termo usado pela norma IEEE C37.118 para designar um canal de comunicação lógico. Mais de um *data stream* pode ser acomodado em um único canal físico e uma única conexão. O termo alude ao fato de que o tráfego consiste em um fluxo contínuo de dados correlacionados.

e 7KV87. Como exemplo, escolhemos o **7KE85**, que é um IED voltado para o registro de perturbações. Suas características são as seguintes:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 12 fasores
 - 4 de frequência, com taxa de mudança de frequência
- Portas adicionais ¹¹:
 - 35 entradas digitais
 - 27 saídas digitais
- Capacidade de comunicação:
 - até frames por segundo em 60 Hz
 - até 3 PDCs
 - 2 portas Ethernet separadas, uma para comunicação com PDC e a outra para outros clientes
- Opções de formato para envio ao PDC:
 - 3 fasores independentes
 - fasor de sequência positiva
- Opções para sincronismo de tempo:
 - IRIG-B
- Compatibilidade:
 - IEEE C37.118, classes P e M
 - NERC CIP (cyber-security)
- Protocolos de comunicação ¹¹:
 - IEC 61850
 - IEC 62439-3 (PRP e HSR)
- Funções de proteção e controle adicionais:
 - Alarmes de sobretensão, subtensão e sequência (positiva, negativa e zero) de tensão
 - Alarmes de sobrefrequência e subfrequência
 - Alarmes de sobrecorrente, sequência (positiva, negativa e zero) de corrente e sobrepotência
 - Alarmes de taxa de mudança de tensão, corrente, frequência e potência
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V, f e componentes simétricas)
 - Qualidade de energia de acordo com IEC 61000-4-30 (class S).
 - Lógica programável
 - SOE
- Precisão: conforme IEEE C37.118.1a-2013
- Não exige transdutores externos
- Frequência de amostragem: até 16 kHz
- Compressão de dados sem perda [Siemens 2015 1, Siemens 2014 1, Siemens 2014 2]

A função PMU também está disponível no registrador de perturbação **SIMEAS R-PMU**, mais antigo mas com capacidade para maior número de entradas. Suas características são as seguintes:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 32 fasores
 - 32 de frequência, com taxa de mudança de frequência
 - 64 entradas digitais
- Portas adicionais: não permite ¹²
- Capacidade de comunicação:
 - até 60 frames por segundo em 60 Hz
 - até 1 PDC e 1 outro dispositivo ao mesmo tempo
- Opções de formato para envio ao PDC
 - fasores independentes
- Opções para sincronismo de tempo:
 - DCF77
- Compatibilidade:
 - IEEE C37.118, nível 1
- Protocolos de comunicação:
 - TCP/IP
- Funções de proteção e controle adicionais:
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V e f)
 - Registro de perturbações com lógica programável
 - SOE
- Precisão:
 - TVE: 1,0%
 - sincronização: 5 μ s
- Não exige transdutores externos
- Frequência de amostragem: 11.5 kHz [Siemens 2015 2, Siemens 2012 1]

GE. A GE comercializa a PMU dedicada **N60**, que é um IED da família Multilin. Suas características são as seguintes:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 46 fasores
 - 6 de frequência, com taxa de mudança de frequência
- Portas adicionais ¹³:
 - 24 entradas/saídas digitais
- Capacidade de comunicação:
 - 3 portas Ethernet independentes (expansível até 9)
 - até 120 frames por segundo em 60 Hz
 - até 4 PDCs ao mesmo tempo
- Opções de formato para envio ao PDC:
 - fasores independentes

¹¹Módulos de I/O e comunicação avulsos da família Siprotec 5 podem ser adicionados.

¹²A não ser que se diminua o número de cartões de aquisição de dados fasoriais.

- Opções para sincronismo de tempo:
 - IEEE 1588 (PTP)
- Compatibilidade:
 - IEEE C37.118-2011, classes P e M
 - NERC CIP, NITIR 7628, AAA (Radius e LDAP), RBAC, Syslog (cyber-security)
- Protocolos de comunicação:
 - IEC 61850-8-1 (station bus), IEC 61850-9-2 (process bus) e IEC 61850-90-5 (sincrofasores)
 - IEC62439-3 (PRP)
 - DNP3.0
 - IEC 608-5-103 e 104
 - Modbus TCP/IP e RTU
- Funções de proteção e controle adicionais:
 - Alarmes de sobretensão e subtensão
 - Alarmes de sobrefrequência, subfrequência e taxa de mudança de frequência
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V, PF, f e componentes simétricas)
 - Alarmes de sobrecorrente, sobrepotência, inversão de fluxo e proteção térmica
 - Alarmes de sincronismo
 - Lógica programável
 - SOE
 - Oscilografia
- Precisão: conforme IEEE C37.118-2011, classes P e M
- Não exige transdutores externos [GE 2015 1, GE 2015 2]

A função PMU também está disponível em vários relés de proteção da família Multilin UR: D60, F60, G60, L30, L90 e T60. Como exemplo, seguem as características do **UR L90**, voltado para proteção de linhas:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 9 fasores
 - 2 de frequência, com taxa de mudança de frequência
- Portas adicionais ¹³:
 - 8 entradas/saídas digitais (expansíveis até 32)
- Capacidade de comunicação:
 - 3 portas Ethernet independentes (expansível até 9)
 - até 120 frames por segundo em 60 Hz
 - até 4 PDCs ao mesmo tempo
- Opções de formato para envio ao PDC:
 - fasores independentes
- Opções para sincronismo de tempo:

- IEEE 1588 (PTP)
- Compatibilidade:
 - IEEE C37.118-2011, classes P e M
 - NERC CIP, NITIR 7628, AAA (Radius e LDAP), RBAC, Syslog (cyber-security)
- Protocolos de comunicação:
 - IEC 61850-8-1 (station bus), IEC 61850-9-2 (process bus) e IEC 61850-90-5 (sincrofasores)
 - IEC62439-3 (PRP)
 - DNP3.0
 - IEC 608–5–103 e 104
 - Modbus TCP/IP e RTU
- Funções de proteção e controle adicionais:
 - Alarmes de sobretensão e subtensão
 - Alarmes de impedância
 - Alarmes de sobrecorrente, sobrecorrente direcional e sequência negativa de corrente
 - Alarmes de sobrefrequência, subfrequência e taxa de mudança de frequência
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V, PF, f e componentes simétricas)
 - Alarmes de inversão de fluxo, proteção térmica e falha do disjuntor
 - Alarmes de sincronismo
 - Religamento automático
 - Lógica programável
 - SOE
 - Oscilografia
- Precisão: conforme IEEE C37.118-2011, classes P e M
- Não exige transdutores externos [GE 2015 3, GE 2015 4]

Schweitzer. A Schweitzer comercializa a PMU dedicada **SEL-2240**, que é um IED da família Axion. Suas características são as seguintes:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 64 fasores
 - 30 entradas digitais
- Portas adicionais ¹⁴:
 - 0 saídas digitais
 - 0 saídas analógicas
- Capacidade de comunicação:
 - 2 portas Ethernet: 1 EtherCAT e 1 de uso geral ¹⁴

¹³Módulos de I/O avulsos da família Multilin podem ser adicionados.

- até 60 frames por segundo em 60 Hz
- até 2 PDCs ao mesmo tempo ¹⁵
- Opções de formato para envio ao PDC:
 - fasores independentes
- Opções para sincronismo de tempo:
 - EtherCAT
 - IRIG-B
- Compatibilidade:
 - IEEE C37.118.1-2011 e C37.118.1a-2014, classes P e M
 - NERC CIP, AAA (LDAP), Syslog, Port Control (cyber-security)
- Protocolos de comunicação:
 - IEC 61850
 - EtherCAT
 - SSH (Secure Shell)
 - DNP3 Level 3 serial e LAN/WAN client/server
 - LG 8979
 - SES-92
 - IEC 608–5–101 e 104
 - Modbus TCP e RTU
 - SEL ASCII, Fast Message e Mirrored Bits
- Funções de proteção e controle adicionais ¹⁴:
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V, PF, f e componentes simétricas)
 - Lógica programável (IEC 61131)
 - SOE
 - PID
 - Web server
 - Fontes de alimentação redundantes
 - Oscilografia COMTRADE (IEEE C37.111-1999)
- Precisão
 - Amplitude: 0,25% em amplitude e 2° em ângulo de fase
 - Frequência: 5 mHz
- Frequência de amostragem: até 24 kHz
- Filtro passa-baixa de 5 KHz [Schweitzer 2015 1]Schweitzer 2014 1Schweitzer 2014 2

A função PMU também está disponível em vários relés de proteção da família Axion: 311C, 311L, 351, 351A, 351S, 351RS, 487E, 487V, 421, 451, 411L, 651R-2, 751, 751A, 700G, 787, 735 e 2431. Como exemplo, seguem as características do **SEL-651R-2**, voltado para controle de religadores:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 12 fasores
 - 16 entradas digitais

- Portas adicionais:
 - 7 entradas digitais
 - 8 saídas digitais
- Capacidade de comunicação:
 - 1 porta Ethernet (expansível até 2)
- Opções de formato para envio ao PDC:
 - fasores independentes
- Opções para sincronismo de tempo:
 - IRIG-B
- Compatibilidade:
 - IEEE C37.118-2011
- Protocolos de comunicação:
 - IEC 61850
 - Modbus
 - SEL ASCII e Mirrored Bits
- Funções de proteção e controle adicionais:
 - Controle de religadores
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V e f)
 - Alarmes de sub e sobretensão
 - Alarmes de sobrecorrente e sobrecorrente direcional
 - Alarmes de subfrequência e taxa de mudança de frequência
 - Localização de falta
 - Registro de eventos
 - Filtro para segundo harmônico
 - Web server
 - Monitoramento de qualidade da energia
- Precisão: IEEE C37.118-2005 nível 1 [Schweitzer 2015 2]

Alstom. A Alstom comercializa a PMU dedicada **P847**, que é um IED da família MiCOM. Suas características são as seguintes:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 15 fasores
 - 24 entradas digitais
- Portas adicionais ¹⁶:
 - 24 saídas digitais
- Capacidade de comunicação:
 - 1 porta Ethernet (redundância opcional)
 - até 60 frames por segundo em 60 Hz
- Opções de formato para envio ao PDC:

¹⁴Módulos de avulsos da família Axion podem ser adicionados, aumentando essa capacidade.

¹⁵Ou até 6, se forem transmitidos no máximo 30 frames por segundo.

- fasores independentes
 - componentes simétricas
 - Opções para sincronismo de tempo:
 - IRIG-B
 - GPS
 - Compatibilidade:
 - IEEE C37.118-2005 nível 1
 - Protocolos de comunicação:
 - IEC 61850
 - DNP3
 - K-bus
 - Funções de proteção e controle adicionais ¹⁴:
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V, f e componentes simétricas)
 - Alarmes de sub e sobretensão e taxa de variação de tensão
 - Alarmes de sobrecorrente e sequência negativa
 - Alarmes de sub e sobrefrequência e taxa de mudança de frequência
 - Localização de falta
 - Precisão:
 - TVE 1%
 - Frequência: 25 mHz
- [Alstom 2015]

Estão disponíveis 3 modelos pre-configurados: P847A, B e C.

Arbiter. A Arbiter comercializa a PMU dedicada **1133A**. Suas características são as seguintes:

- Capacidade de coleta e transmissão de dados:
 - 6 fasores
 - 4 entradas digitais
 - 4 saídas digitais
- Portas adicionais: não permite
- Capacidade de comunicação:
 - 1 porta Ethernet (redundância opcional)
 - até 60 frames por segundo em 60 Hz
- Opções de formato para envio ao PDC:
 - fasores independentes ou componentes simétricas
 - formato inteiro ou ponto flutuante
- Opções para sincronismo de tempo:
 - IRIG-B
 - GPS
- Compatibilidade:

¹⁶Módulos avulsos da família MiCOM podem ser adicionados, aumentando essa capacidade.

- IEEE C37.118-2005
- Protocolos de comunicação:
 - PQ-DIF
 - DNP 3.0
 - Modbus
 - Arbiter Power Sentinel
- Funções de proteção e controle adicionais ¹⁴:
 - Cálculo de valores eficazes (S, P, Q, I, V, PF, f e componentes simétricas)
 - Qualidade da energia (harmônicos, *flicker*, interrupções e flutuações de tensão)
 - Medição de faturamento
 - Registro de eventos
- Precisão:
 - TVE 0,1%
 - Frequência: 1 ppm
 - Sincronismo: 1 μ s
 - Ângulo de fase 0,1°
- Algoritmos selecionáveis
- Rastreamento da frequência para medição mais precisa, na faixa de ± 10 Hz
- Algoritmos para compensação de erro de TCs e TPs
- Frequência de amostragem: 10,2 kHz
- Podem ser criadas até 2 PMUs virtuais, cada uma com sua própria configuração [Arbiter 2013, Arbiter 2012 1, Arbiter 2012 2]

NR Electric (China). A NR comercializa a PMU dedicada **PCS-996 PMU**. Suas características são as seguintes:

- Função de cálculo de amplitude de fasores e ângulos de fase de fasores, tais como Ua, Ub, Uc, U1, Ia, Ib, Ic, I1, Eq, etc.
- Cálculo dos valores de medição, tais como P, Q, f, df/dt etc.
- Supervisão dos sinais binários, como status seccionador, sinal de operação da proteção, sinal operação PSS, etc.
- Função de comunicação em tempo real: envio de dados fasoriais para PDC ou centro de controle WAMS através do protocolo IEEE C37.118.
- Função de gravação por disparo: quantidades elétricas ou entradas binárias.
- Função de gravação, incluindo 1024 eventos de I/O, 1024 eventos de alarme e 1024 logs.
- Função de gravação de distúrbios: 1024 faltas, 1024 formas de onda de perturbação (formato COMTRADE).
- Registro de dados de perturbações e faltas.
- Sincronização de fasores via sinal de tempo GPS.

- Até 24 entradas de tensão/24 entradas de corrente, 36 BIs e 4 BOs opcionais.
- Comunicação duplicada para PDC: uma ponto-a-ponto de fibra óptica e uma 10/100BaseTX ou 10/100BaseFX.
- PDC: Modelo PCS-996 PDC
 - Função de concentração de dados: O PCS-996 PDC recebe dados fasoriais em tempo real a partir de vários PMUs. Em seguida, o PDC envia esses dados acumulados para o WAMS.
 - Função dinâmica de gravação: armazenamento e backup local de dados fasoriais.
 - Comunicações:
 - * Duas portas RJ-45 Ethernet e duas portas Ethernet de fibra óptica, que suportam IEC60870-5-103, ou protocolo IEC61850. Estas duas portas RJ-45 Ethernet pode também ser usado para o serviço FTP.
 - * Uma porta RS-485 de série é usado para sincronização de relógio.
 - * Uma porta frontal RS-232 serial é utilizada para testar e configurar o dispositivo.
- Tecnologia de relés de proteção e elevada performance eletromagnética (EMC performance).
- Frequência de amostragem: 24 a 96 amostras/ciclo (1.2kHz to 4.8kHz for 50Hz).
- Taxa de transferência: 10 a 100 fasores/segundo.
- Compatibilidade com a norma IEEE 1344 e IEEE C37.118.
- Medição fasorial ininterrupta durante falta e distúrbios.
- Rastreamento da frequência para medição mais precisa.
- Canais de comunicação duplos para evitar congestionamento de Rede durante aquisição de dados de falhas e distúrbios.
- Dados em tempo real através de ponto-a-ponto ótico usando IEC 60044-8.
- Dados de registro de perturbação e de falha através de LAN usando IEC 61850 ou IEC 60870-5-103. [NR 2015]

REFERÊNCIAS

- [ABB 2014 1] ABB, **Phasor measurement unit RES670 2.0 Product Guide**. Disponível em [http://www09.abb.com/global/scot/scot400.nsf/veritydisplay/9060b199623e699ac1257de1002ef1af/\\$file/1MRK511319-BEN_-_en_Product_Guide_Phase_measurement_unit_RES670_2.0.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot400.nsf/veritydisplay/9060b199623e699ac1257de1002ef1af/$file/1MRK511319-BEN_-_en_Product_Guide_Phase_measurement_unit_RES670_2.0.pdf), acesso em 02/04/2015.
- [ABB 2014 2] ABB, **Phasor Measurement Unit RES670 Ver. 2.0 Technical Summary**. Disponível em [http://www09.abb.com/global/scot/scot301.nsf/veritydisplay/4c8d306f9f4a07aec1257d8500461539/\\$file/1MRK511326-SEN_LoRes_en_Wide_area_protection_RES670_2.0_IEC_-_Technical_summary.pdf](http://www09.abb.com/global/scot/scot301.nsf/veritydisplay/4c8d306f9f4a07aec1257d8500461539/$file/1MRK511326-SEN_LoRes_en_Wide_area_protection_RES670_2.0_IEC_-_Technical_summary.pdf), acesso em 02/04/2015.

- [ABB 2015 1] ABB, **RES670 - Phasor measurement unit**. Disponível em <http://new.abb.com/substation-automation/products/protection-control/phasor-measurement/res670>, acesso em 02/04/2015.
- [ABB 2015 2] ABB, **Smart Grids - energia eficiente para um mundo sustentável**. Disponível em <http://www.abb.com.br/smartgrids>, acesso em 16/04/2015.
- [Abril 2015 1] Editora ABRIL, **Mercado global de smart grid deve dobrar até 2020**. Disponível em <http://exame.abril.com.br/mundo/noticias/mercado-global-de-smart-grid-deve-dobrar-ate-2020>, acesso em 16/04/2015.
- [Abril 2015 2] Editora ABRIL, **O Brasil na onda das smart grids**. Disponível em <http://exame.abril.com.br/revista-exame/edicoes/1040/noticias/o-brasil-na-onda-das-smart-grids>, acesso em 16/04/2015.
- [Alstom 2015] ALSTOM Grid, **MiCOM Alstom P847 Phasor Measurement Unit (PMU)**. Disponível em <http://www.alstom.com/Global/Grid/Resources/Documents/Automation/NSR/MiCOM%20Alstom%20P847BC%20Technical%20Data%20Sheet%20GB.pdf>, acesso em 13/04/2015.
- [Arbiter 2012 1] ARBITER Systems, **Synchronized Power Quality/Revenue Standards**. Disponível em <http://www.arbiter.com/files/product-attachments/1133a.pdf>, acesso em 14/04/2015.
- [Arbiter 2012 2] ARBITER Systems, **Model 1133A Functional Description**. Disponível em http://www.arbiter.com/files/product-attachments/1133a_functional_description.pdf, acesso em 14/04/2015.
- [Arbiter 2013] ARBITER Systems, **Model 1133A Phasor Measurement Specifications**. Disponível em http://www.arbiter.com/files/product-attachments/1133_phasor_measurement_specifications.pdf, acesso em 14/04/2015.
- [Arumugam et. ali. 2011] Arumugam et. ali., **A Brief Review on Advances of Harmonic State Estimation Techniques in Power Systems**. Disponível em <http://www.ijee.org/papers/34-I040.pdf>, acesso em 16/04/2015.
- [BPA 2013] Bonneville Power Administration (BPA), **Synchrophasor success lands BPA its first Platts Award**. Disponível em <https://www.bpa.gov/news/newsroom/Pages/Synchrophasor-success-lands-BPA-its-first-Platts-Award.aspx>, acesso em 05/04/2015.
- [CPFL 2015] CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz), **O que é?**. Disponível em <http://www.cpfl.com.br/energias-sustentaveis/sites-tematicos/smart-grid/Paginas/default.aspx>, acesso em 16/04/2015.
- [GE 2015 1] GE Digital Energy, **Multilin N60 Network Stability and Synchrophasor Measurement System**. Disponível em <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/catalog/n60.htm>, acesso em 04/04/2015.
- [GE 2015 2] GE Digital Energy, **Multilin N60**. Disponível em <http://www.gedigitalenergy.com/app/DownloadFile.aspx?prod=n60&type=1&file=1>, acesso em 04/04/2015.
- [GE 2015 3] GE Digital Energy, **Multilin L90 Line Current Differential System**. Disponível em <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/catalog/l90.htm>, acesso em 04/04/2015.
- [GE 2015 4] GE Digital Energy, **Multilin L90 Line Protection System with Segregated Line Current Differential and Distance Protection**. Disponível em <http://www.gedigitalenergy.com/app/DownloadFile.aspx?prod=l90&type=1&file=1>, acesso em 04/04/2015.
- [NR 2015] NR Electric, **PCS-996 Phasor Measurement Unit**. Disponível em <http://www.nrec.com/en/product/PCS-996.html>, acesso em 16/04/2015.

- [Hurtgen e Maun 2012] M. HURTGEN e J. MAUN, **Applications of PMU measurements in the Belgian electrical grid**. Disponível em http://statbel.fgov.be/fr/binaries/20120420_PMU_Final_Report_tcm326-200078.pdf, acesso em 05/04/2015.
- [ORNL 2014] Oak Ridge National Laboratory (ORNL), **Factors Affecting PMU Installation Costs**. Disponível em <http://energy.gov/oe/downloads/factors-affecting-pmu-installation-costs-october-2014>, acesso em 05/04/2015.
- [Schweitzer 2014 1] SCHWEITZER Engineering Laboratories, **SEL-2240 Axion Platform — PMU Solutions**. Disponível em <https://www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=106401>, acesso em 13/04/2015.
- [Schweitzer 2014 2] SCHWEITZER Engineering Laboratories, **SEL-2240 Data Sheet**. Disponível em <https://www.selinc.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=10595>, acesso em 13/04/2015.
- [Schweitzer 2015 1] SCHWEITZER Engineering Laboratories, **SEL-2240 Axion Distributed Control and Integration Platform**. Disponível em <https://www.selinc.com/sel-2240/>, acesso em 13/04/2015.
- [Schweitzer 2015 2] SCHWEITZER Engineering Laboratories, **SEL-651R Advanced Recloser Control**. Disponível em <https://www.selinc.com/SEL-651R/>, acesso em 13/04/2015.
- [Schweitzer 2015 3] SCHWEITZER Engineering Laboratories, **Tecnologias de Comunicação para Smart Grid — T2**. Disponível em <http://www.selinc.com.br/cursos/T2.aspx>, acesso em 16/04/2015.
- [Siemens 2012 1] SIEMENS, **Digital Fault Recorder SIMEAS R-PMU V40.01**. Disponível em <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/power-quality-measurements/recorder-measurement-unit/Pages/simeas-r-pmu.aspx>, acesso em 03/04/2015.
- [Siemens 2014 1] SIEMENS, **Relay Selection Guide Edition 3**. Disponível em <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/Protection/fault-recorder/Pages/7KE85.aspx>, acesso em 03/04/2015.
- [Siemens 2014 2] SIEMENS, **Fault Recorder 7KE85 V06.00 Manual**. Disponível em <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/Protection/fault-recorder/Pages/7KE85.aspx>, acesso em 03/04/2015.
- [Siemens 2015 1] SIEMENS, **SIPROTEC 7KE85 Fault Recorder**. Disponível em <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/Protection/fault-recorder/Pages/7KE85.aspx>, acesso em 03/04/2015.
- [Siemens 2015 2] SIEMENS, **SIMEAS R-PMU Digital Fault Recorder with Phasor Measurement Unit (PMU)**. Disponível em <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/power-quality-measurements/recorder-measurement-unit/Pages/simeas-r-pmu.aspx>, acesso em 03/04/2015.
- [Siemens 2015 3] SIEMENS, **Smart grid — a rede elétrica inteligente do futuro**. Disponível em <http://www.siemens.com.br/desenvolvimento-sustentado-em-megacidades/smart-grid.html>, acesso em 16/04/2015.
- [Tianshu 2013] TIANSHU Bi, **The dynamic behavior of PMU and the latest development in China**. Disponível em https://filebox.ece.vt.edu/~shukla/tps/Session2/The%20symposium%20for%20Phadke%20and%20Thorp_0508.pdf, acesso em 05/04/2015.
- [de Vries 2013] R. de VRIES, **Phasor Measurement Units (PMUs) and Time Synchronization at European Utilities**. Disponível em [http://www.smartgrid.agh.edu.pl/pdf/Phasor_Measurement_Units_\(PMUs\)_and_Time_Synchronization.pdf](http://www.smartgrid.agh.edu.pl/pdf/Phasor_Measurement_Units_(PMUs)_and_Time_Synchronization.pdf), acesso em 05/04/2015.

- [Zhou et. al. 2007 1] ZHOU et. al., **Projeto ESTAL: Utilização de Fasores no Sistema Interligado Nacional do ONS. Relatório 3: Aplicações das PMU e seus Requisitos**. Disponível em <http://www.ons.org.br/publicacao/ASC/Medicao%20Fasorial/Projeto%2011.11%20-%20Plano%20de%20A%E7%E3o%20do%20ONS%20-%20uso%20no%20TR%20de%20sincrofasores/Documentos%20produzidos%20pela%20KEMA/Relat%F3rio%203/ONS%20ESTAL%20-%20SMSF%20-%20Relat%F3rio%203.pdf>, acesso em 16/04/2015.
- [Zhou et. al. 2007 2] ZHOU et. al., **Projeto ESTAL: Utilização de Fasores no Sistema Interligado Nacional do ONS. Relatório 8: Instalação das PMU por Etapas**. Disponível em <http://www.ons.org.br/publicacao/ASC/Medicao%20Fasorial/Projeto%2011.11%20-%20Plano%20de%20A%C3%A7%C3%A3o%20do%20ONS%20-%20uso%20no%20TR%20de%20sincrofasores/Documentos%20produzidos%20pela%20KEMA/Relat%C3%B3rio%208/ONS%20ESTAL%20-%20SMSF%20-%20Relat%C3%B3rio%208.pdf>, acesso em 05/04/2015.