



**Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência-GPC**

**SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL (RTDS) DO SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA DA CHESF:  
ESPECIFICAÇÕES, TOPOLOGIA DO SISTEMA, MODELAGEM, ENSAIOS E VALIDAÇÃO.**

**DENYS LELLYS(1); DÁCIO DA SILVA MELO(2); GUILHERME LOURO JUSTINO(3);  
GE GRID(1);CHESF(2);FPTI(3);**

## **RESUMO**

Este artigo apresentará os conceitos da tecnologia de medição fasorial sincronizada relativo à sua estrutura e as principais aplicações voltadas à melhoria da operação do sistema de potência (SEP) e todas as fases desenvolvidas pela CHESF relativo as especificações, aquisição, topologia do sistema, modelagem, e, em especial as simulações executadas no simulador em tempo (RTDS) sendo esta atividade em simulador RTDS inédita no Brasil e finalmente os resultados e validação do sistema para instalação no sistema de potência da CHESF.

Serão apresentadas ainda as conclusões do trabalho, contribuições e sugestões para os demais agentes quanto a ensaios em simulador RTDS.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Simulação, PMU, Fasores, Performance, RTDS, Validação.

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

Hoje em dia, com a integração em larga escala de fontes de energia renováveis (solar, eólica, etc) em áreas remotas e as novas interconexões, as potenciais oscilações entre áreas são uma preocupação crescente e os sistemas de medição sincrofasorial sincronizados (SMF) podem ajudar, especialmente durante as ocorrências abaixo:

- A indicação em tempo real do amortecimento que acompanhará uma perturbação pode ajudar a maximizar a capacidade de transferência de energia entre as áreas da rede;
- Uma vez adquirida a experiência, espera-se usar as medições SFM como sinal de feedback nos circuitos de controle de amortecimento de FACTS, HVDC e geradores síncronos (PSS);
- Melhorias significativas na dinâmica e estabilidade do sistema são esperadas.

Estes sistemas de medição sincrofásorial, estão sendo instalados extensivamente ao redor do mundo, sendo utilizados para proporcionar melhorias nas atividades de operação do sistemas elétricos, como análise de eventos, o monitoramento, e, progressivamente, adotados no suporte para tomada de decisão em centros de controle.

O SMF pode medir os fasores de corrente e tensão em diversos pontos do sistema e fisicamente distantes entre si através da unidade de medição fasorial PMU (Phasor Measurement Unit), permitindo visibilidade operacional em tempo real do sistema de potência. Estas unidades de medição fasorial (PMU) devem ter performance e características conforme a norma IEEE standard C37.118 [1] [2].

As principais características dos sistemas de medição fasorial sincronizadas são: alta precisão, elevada taxa de amostragem e sincronização de medidas fasoriais. Estas características tornam o sistema de medição sincrofásorial capaz de monitorar fenômenos dinâmicos dos sistemas elétricos de potência (SEP), o que não é possível com os atuais sistemas de supervisão e controle (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition).

Capitaneado pelo O.N.S, o Brasil tem um projeto de instalação de PMU em andamento em todo o país baseado na tecnologia de medição de sincrofases para registro de perturbações dinâmicas, monitoramento em tempo real e aprimoramento da estimativa de estado. O principal motivo é aumentar a confiabilidade dos sistemas interligados brasileiros - sistemas de energia Norte / Nordeste e Sul / Sudeste [3].

Neste contexto, nos últimos anos, o O.N.S iniciou projeto para instalação desta tecnologia no sistema interligado nacional (SIN) com objetivo de aumentar a segurança operacional através deste sistema, cabendo os agentes a aquisição, instalação, operação e manutenção do sistema de medição fasorial sincronizada e também a implantação de infraestrutura de coleta dos sincrofases, via PDC (Phasor Data Concentrator) e envio dos dados fasoriais ao O.N.S

Descreveremos também o desenvolvimento do ambiente de testes para permitir a implementação das simulações em tempo real (RTDS) do sistema de medição fasorial sincronizada de modo que os resultados possam ser utilizados na operação em tempo real no sistema da CHESF.

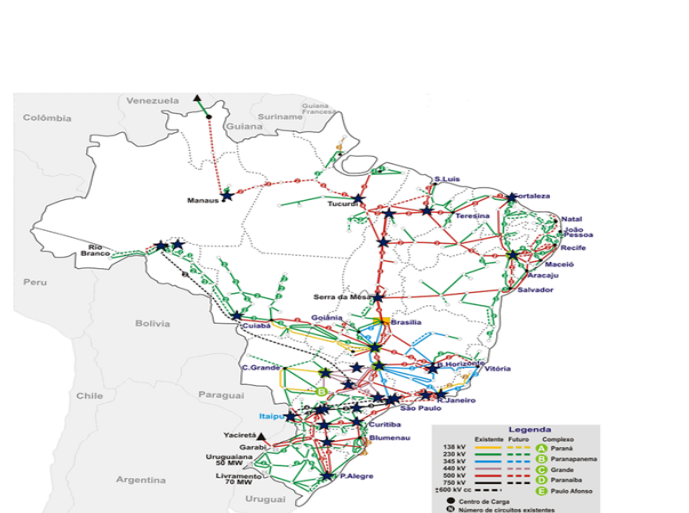


Figura 01 – projeto SMF do Brasil – Overview

O projeto SMF do Brasil provavelmente alcançará mais de 300 subestações medindo dados sincronizados (Figura 01).

Basicamente, a arquitetura geral do SFM do Brasil, conforme mostrado na Figura 02, terá 03 (três) níveis com duas opções de conexão do nível da subestação até os concentradores de dados fasoriais (PDC) do ONS, conforme explanação a seguir:

- Concentrador de dados fasoriais redundante (PDC Primário–Brasília e PDC Secundário – Rio de Janeiro) para segurança de dados – Nível 3;
- Concentrador de dados no centro de controle regional ou transmissão direta da subestação para os centros de controle do ONS – Nível 2;
- Concentrador de dados fasoriais em cada subestação (PDC local) para armazenamento local, agregação, processamento e reembalagem – Nível 1;
- Os dados podem ser adquiridos em taxas altas (60 frame/s) no nível da subestação e amostrados para 12 frame/s a serem transmitidos para o nível superior;
- Rede TCP-IP privada usando canais de telecomunicação dedicados para garantia de largura de banda e segurança do sistema;
- Uso do padrão IEEE C37.118 para transferência de dados e formato de dados UDP / IP com endereçamento IP multicast para fasores em tempo real;
- Um máximo de 2 segundos de latência do momento de medição para os dados disponíveis para exibição no centro de controle do ONS.

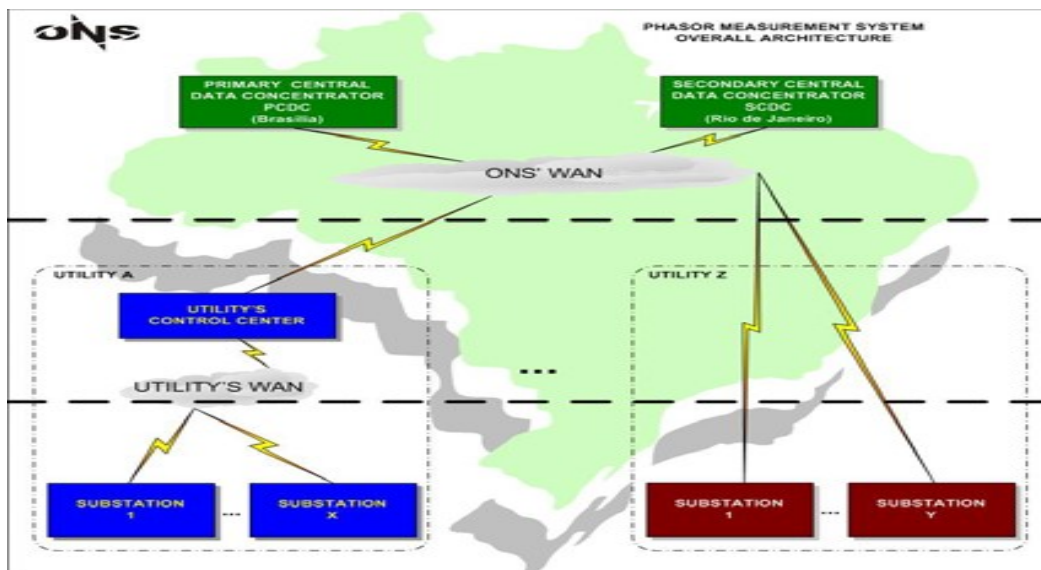


Figura 2 – Arquitetura Básica do SMF do Brasil

## 2.0 - SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL DA CHESF - OVERVIEW

Com o objetivo de atender o projeto de implantação do Operador Nacional do Sistema (ONS) responsável pela coordenação, implementação e uso do SMF no Brasil, a CHESF desenvolveu o sistema de medição fasorial com arquitetura conforme mostrado na Figura 03 abaixo e descritivo a seguir:

Nesta arquitetura observa-se as PMUs 1, 2, 3 e 4 responsáveis pela aquisição dos fasores de tensão e corrente da linha de transmissão Angelim, Olindina, Usina Xingo e Luiz Gonzaga de 500 kV através dos transformadores de tensão e corrente na Subestação de Paulo Afonso IV. Estas PMUs foram instalados em painéis posicionados nas cabanas de reles da referida instalação. Através de switch e firewall e uma rede óptica de 500 metros, as PMUs se interligam ao sistema de sincronismo de tempo (SBT), ao Concentrador de dados fasoriais (PDC local), instaladas em um painel na sala de comando da instalação, que funciona como um backup local e ao mesmo tempo se interliga a rede corporativa da empresa.

De forma similar, observa-se as PMUs 5 e 6 responsáveis pela aquisição dos fasores de tensão e corrente da linha de transmissão Pecém II e Quixadá de 500 kV através dos transformadores tensão e corrente na Subestação de Fortaleza II. Estas PMUs foram instaladas em um painel posicionado na cabana de relés da referida instalação. Através de switch e firewall e uma rede óptica de 1500 metros, as PMUs se interligam ao sistema de sincronismo de tempo (SBT), ao concentrador de dados fasoriais (PDC), instalados em um painel na sala de comando da instalação, que funciona como um backup local e ao mesmo tempo se interliga a rede corporativa da empresa.

Através da rede corporativa com um protocolo unicast, os fasores do PDC local são enviados a um segundo PDC localizado no centro de controle regional de operação do sistema (COS) o qual disponibiliza os fasores para o sistema supervisorio local e ao mesmo tempo para os centros do operador nacional do sistema ONS no Rio de Janeiro e em Brasília.

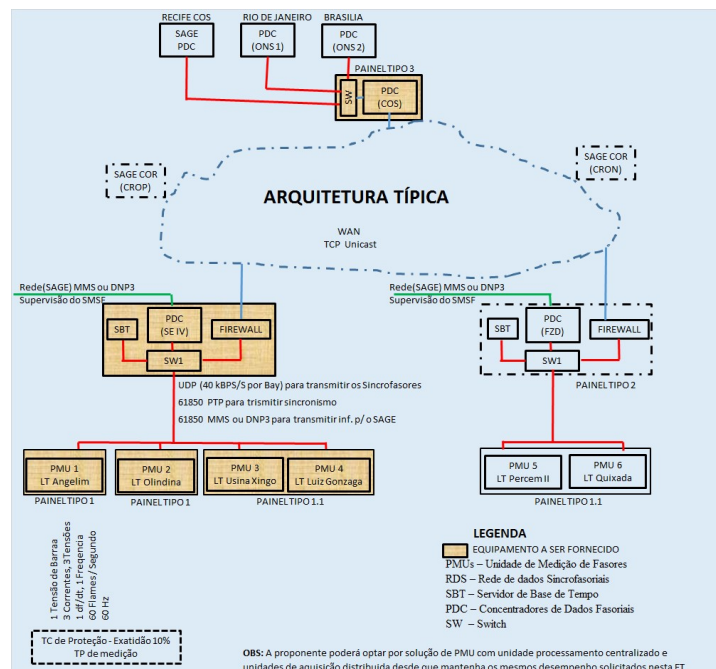


Figura 3 – SMF – Arquitetura CHESF

### 3.0 - ENSAIOS DO SMF DA CHESF NO RTDS (REAL TIME DIGITAL SIMULATIONS)

O principal objetivo dos ensaios foi validar a performance do sistema de medição sincrofasorial quanto ao erro máximo total calculado (TVE – Total vector error), conforme norma IEEE C37.118 - 2011 (<1% TVE), e diversas simulações foram executadas no simulador em tempo real (RTDS) do laboratório de automação e simulação de sistemas elétricos (Lasse) pertencente ao Parque tecnológico de Itaipu (PTI).

Neste contexto, será apresentado a seguir a topologia do sistema simulado da CHESF, incluindo o PDC de coleta dos fasores e as ferramentas computacionais para aferir a performance do sistema.

Na Figura 04, apresentamos a arquitetura básica do SMF ensaiado e a conexão com o RTDS:

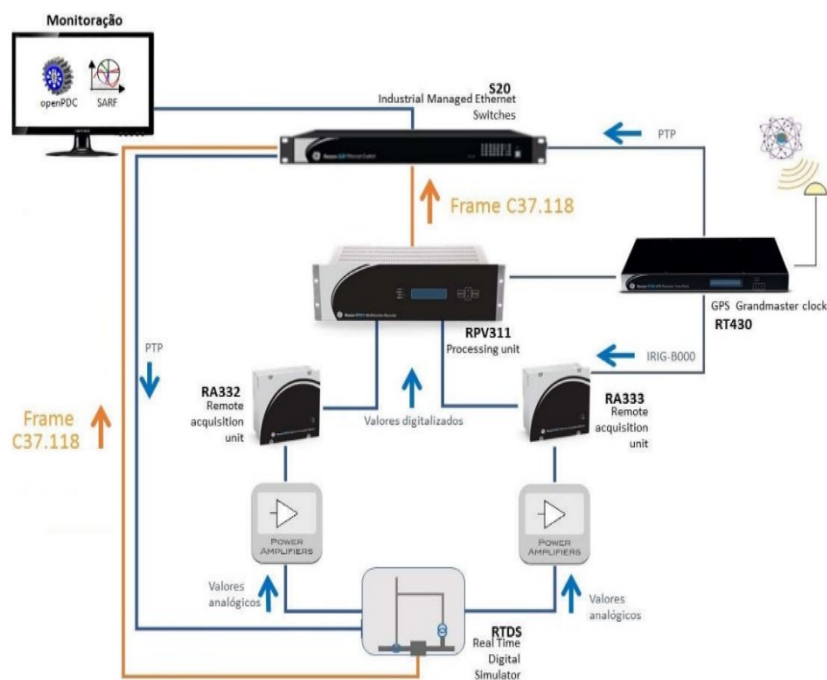


Figura 04 – RTDS & SMF Arquitetura básica

Os requisitos do sistema de potência e os ensaios seguiram as especificações de testes conforme descrição abaixo:

- O sistema de transmissão de 500 kV da CHESF foi modelado usando RTDS para simular condições reais do sistema usando o software RSCAD (Real System Computer Aided Design);
- Todas as informações necessárias para modelagem, como relações nominais do TC/TP, bancos de capacitores em série, reatores de derivação, transposições de linha, impedância de linha, corrente de carga capacitiva, geradores, carga, etc., foram fornecidas pela CHESF para cada seção de linha para modelar com precisão o 500 sistema kV;
- Todos os 600 (seiscentos) casos simulados foram preparados para permitir testes rápidos e automatizados através de scripts. Faltas em diversos pontos do sistema e as condições de

falta foram simuladas, incluindo falhas nas linhas, falhas no barramento, abertura de linhas carregadas pesadas, variação de frequência, banco de capacitores em série, condições de subfrequência, etc.

- Na topologia do sistema simulado da CHESF, representado no simulador RTDS, foram aplicadas 02 (duas) unidades fasoriais reais e 04 (quatro) unidades virtuais devidamente instaladas em pontos estratégicos do sistema (Figura 05).

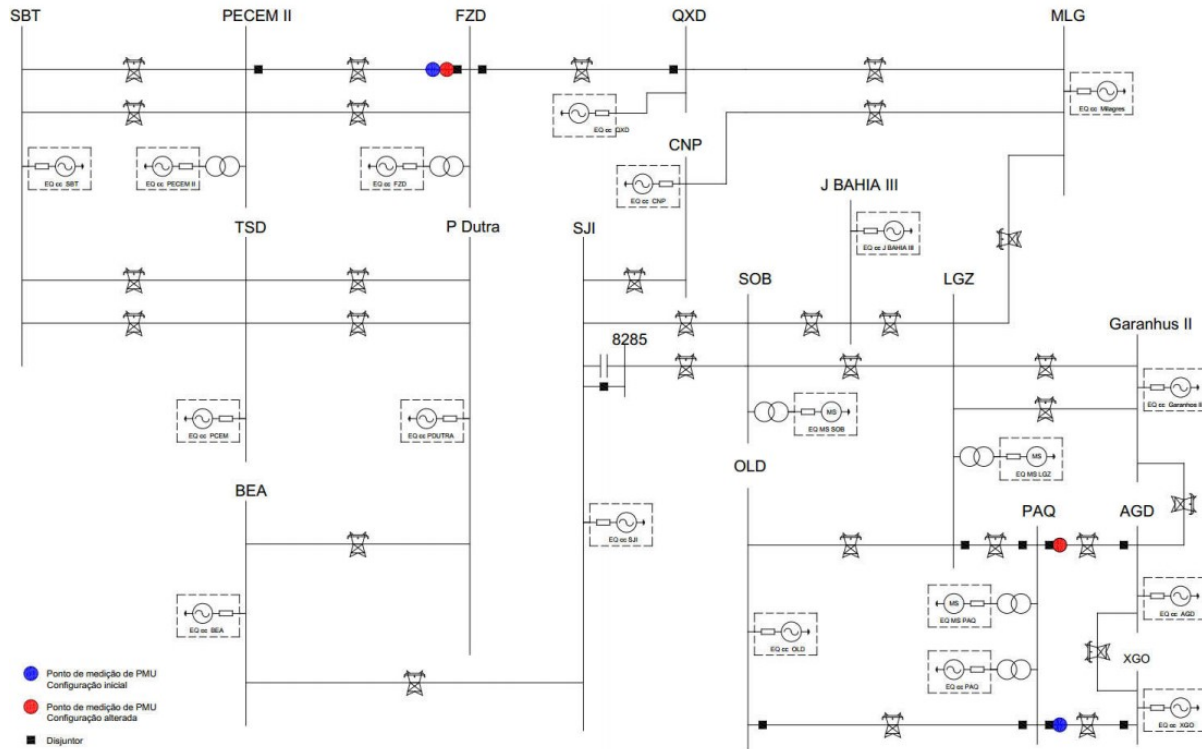


Figura 05 – PMU & RTDS topologia do sistema

A validação do sistema modelado no simulador RTDS foi realizada fazendo as comparações de correntes de curto-circuito entre o modelo em RSCAD e o modelo em Anafas da Chesf. Esse processo consistiu de aplicação de faltas monofásicas e trifásicas em diversas barras do sistema, observando o valor em regime da corrente de falta.

A execução dos casos utilizando o RTDS foi feita de forma automática através do uso de scripts. Dessa forma foi possível programar o RTDS para iniciar uma simulação, realizar as configurações pertinentes ao caso específico que ele deve executar, aplicar a perturbação desejada, encerrar a simulação e então iniciar uma nova simulação para o próximo caso. Tal processo otimiza o tempo de execução dos casos e reduz erros por interferência do usuário.

Ao término da execução dos casos, as informações sobre o comportamento da PMU foram coletadas e ficavam registradas no PDC. A fim de facilitar a análise, optou-se por utilizar o SARF (Sistema de Análise de Rede Fasorial) devido suas ferramentas de análise e sua interface amigável. Com o SARF foi possível realizar cálculos de TVE utilizando os fasores de cada uma das PMUs. Essa etapa serviu para atender as exigências das Chesf quanto as informações que deveriam ser apresentadas na planilha de ensaio.

Um script em Matlab também foi desenvolvido para tratar as informações exportadas pelo SARF e preenchimento da planilha de ensaio com os resultados obtidos dos ensaios conforme detalhes a seguir.



O SARF é um software de análise de registros desenvolvido pelo LASSE, o seu uso durante as análises de resultados foi de interesse devido alguma de suas características/ferramentas. A primeira característica de interesse é sua capacidade de comunicação com o PDC, o SARF é capaz de acessar todos os registros do PDC e carrega-los em sua interface que permitia então colocar lado a lado informações das PMUs reais e virtuais.

Outro ponto relevante é sua capacidade de exportação de dados para o formato CSV. Essa característica torna-se interessante quando se deseja como dados de saída das simulações, uma planilha contendo apenas valores críticos, como por exemplo, o maior TVE ao longo do caso simulado. Uma planilha de resultados dessa forma agiliza o processo de avaliação dos casos, pois apenas os casos que apresentam valores extrapolados acabam por ser avaliados com mais profundidade.

Contudo, durante os ensaios foi notado a necessidade da utilização do Matlab para tratamento de dados pois o procedimento inicial elaborado foi carregar no SARF os dados das PMUs reais e virtuais, durante uma janela de tempo correspondente ao intervalo do primeiro até o ultimo caso de uma bateria. Por isso, foi criado um script no matlab, que agrupava os dados por casos gerados, aplicava filtros com valores máximos e mínimos, e criava a planilha de resultados final, com apenas uma linha de dados por caso gerado.

#### Destaque dos resultados dos testes:

Os testes de PMU especificados no padrão C37.118, bem como os critérios de desempenho, podem ser agrupados em testes de regime contínuo (variação de frequência e magnitude, distorção harmônica e sinais fora de banda) e regime dinâmico (largura de banda, rampa de frequência , etapas de módulo e ângulo e latência).

Faltas internas na linha de transmissão muito próximas da PMU ocorreram um aumento significativo do TVE (Total Error Vector) exatamente na fase transitória durante a abertura da linha (Figura 06).

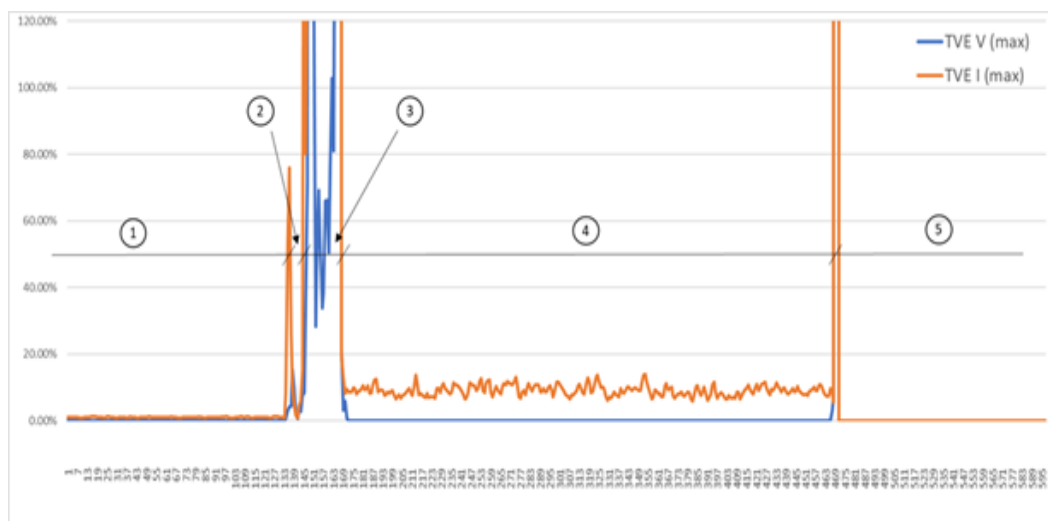


Figura 6 – TVE & Opening line simulation

A explicação para esse resultado inesperado é que o comportamento das medições do sistema de potência e do sistema SPMS é baseado em sinais dinâmicos lentos com frequências de até 5 Hz ou rampas de +/- 1,0 Hz/s. A simulação de faltas e abertura da linha muito próxima da PMU, pode aumentar significativamente o erro de TVE, erro de frequência (FE) e frequência de variação (RFE).

Outro resultado interessante foi a influência da relação do TC na medição dos fasores de corrente, na qual o aumento do TVE foi verificado quando a medição atual estava abaixo de 10% da corrente máxima do TC, sendo decidido, para fins de teste, reduzir a relação de TC de 3000/5 a 1000/5. A PMU será conectada no mesmo circuito do relé de proteção.

A redução da geração hidrelétrica e conseqüentemente a redução da corrente nominal das transmissões da linha se deve ao rápido aumento da geração distribuída muito próxima da carga no nordeste do Brasil, por exemplo, geração de parques eólicos e usinas térmicas.

#### **4.0 - CONCLUSÃO**

Os sistemas de medição fasorial sincronizados (SPMS) são atualmente a tecnologia mais moderna e eficiente para aumentar a confiabilidade do sistema de energia.

No Brasil, a integração de fontes de energia renováveis em áreas remotas e novas interconexões, potenciais oscilações entre áreas, são uma preocupação crescente para o operador nacional do sistema (ONS) e esses SMF podem ajudar a melhorar significativamente a estabilidade e a dinâmica do sistema.

As simulações digitais em tempo real executadas pela CHESF foram fundamentais para avaliar o desempenho e atender aos requisitos da norma.

#### **5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (1) IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems. IEEE Standard C37.118-2005 (Revision of IEEE Std. 1344-1995), 22 March 2006
- (2) IEEE C37.118.2:2011, Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems
- (3) Fernandes, R.; Oliveira L.C.; Castelli, C.A.F., “Monitoramento da estabilidade de tensão em regime permanente em tempo real e as novas perspectivas e aplicações do uso do protocolo IEC 61850-90-5 com a funcionalidade de PMU's, nos IED's de proteção”; XXII SNPTE, Cigré GPC – Brazil, 2013.
- (4) SIM-RT-STT 0061 - Relatório Técnico - Ensaio de Modelo do Registrador Fasorial da GE Reason RPV 311 – FTPI, Brazil 06/07/2018



## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Denys Lellys** é gerente de aplicações técnica sênior na GE Renewable na área de proteção e automação com mais de 30 anos de experiência na América Latina. Sua carreira profissional iniciou na CHESF em 1983 e depois na Alstom, Areva e atualmente na GE Renewable. É membro do CIGRÉ Brasil desde 1998 e autor de vários artigos técnicos em seminários no Brasil tais como: SNPTEE, STPC, SIMPASE, etc. além de internacionais ERIAC, CIGRÉ-Paris, B5 Colloquium Norway 2019. Graduação e pós-graduação na Universidade Federal da Paraíba em 1981 e cursos de sistemas de proteção em Stafford, U.K.



**Dácio da Silva Melo** Nascido em Recife-PE, Brasil em 27 de abril de 1961. Graduado em eletrônica pela Fundação do Ensino Superior de Pernambuco em Recife-PE (1989) e Mestrado em elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco em Recife-PE (2008). Sua experiência profissional inclui: Implantação do Sistema de Controle e Supervisão na regional de Paulo Afonso; Gerenciamento do serviço de manutenção do sistema de controle supervisão da mesma regional; Participação nos projetos de digitalização de diversas subestações e usinas; Participação nos projetos de implantação da rede de Registradores Digitais de Perturbação e responsável pela especificação e implantação do Sistema de Medição Fasorial Sincronizado na CHESF. Participação na Avaliação Extraordinária dos Sistemas de Proteção e controle. Autor e desenvolvedor do sistema automático de diagnóstico de erros de medições em subestações fundamentado na norma IEC 61850.



**Guilherme Louro Justino** é engenheiro eletricitista, formado pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste) em 2011, e desde 2012 atua no Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos – LASSE, principalmente nos temas de simulação em tempo real, proteção de sistemas elétricos e sistemas de distribuição com geração distribuída. Atualmente também participa do programa de mestrado da Unioeste, onde desenvolve pesquisas em localização de faltas em sistemas de distribuição com geração distribuída.