

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

### Estudo da performance da detecção e compensação da saturação de um TC de proteção em tempo real implementado em hardware.

LUIS GUZMAN GARCETE ALDERETE(1); MARIA CRISTINA DIAS TAVARES(1); FABIANO GUSTAVO SILVEIRA MAGRIN(2);  
UNICAMP(1); UTFPR(2);

#### RESUMO

No presente trabalho será avaliado o desempenho de alguns métodos para a detecção e correção dos trechos distorcidos da forma de onda dos sinais de corrente secundária de um transformador de corrente (TC) de proteção. O artigo descreve a implementação dos métodos inicialmente no ambiente de simulação e finalmente em um *hardware* de baixo custo conectado a um Simulador Digital de Tempo Real (RTDS). É apresentada uma análise de sensibilidade da taxa de amostragem no desempenho do algoritmo e é possível observar que o sinal corrigido torna-se muito similar ao sinal íntegro.

#### PALAVRAS-CHAVE

Saturação de TC, *Hardware* comercial, IEC 61869, Simulação em tempo real, Testes *Hardware in the loop*

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A automatização de subestações hoje em dia tornou-se uma realidade e o processo de migração para a sua total implementação por parte das concessionárias de energia está sendo realizada de forma progressiva. Um dos setores mais impactados pela Norma IEC 61850 será o barramento de processo, ou “*process bus*”, pois as saídas dos transformadores de instrumento deverão ter as fiações tradicionais (fios de cobre) substituídas por uma rede dados de área local (LAN) - ethernet. Os transformadores de instrumentos passarão a ser associados a conversores analógico-digitais com capacidade apropriada de formatação de dados necessários para a geração dos valores amostrados ou “*Sampled Values*”.

Os transformadores de instrumentos a serem utilizados para este propósito poderão ser do tipo convencional, ou seja, transformadores com núcleos ferromagnéticos, e também do tipo “não convencional” ou ópticos, denominados NCIT (*Non Conventional Instruments Transformers*, por suas siglas em inglês). Os transformadores de instrumentos atuais (ferromagnéticos) deverão ser conectados a um dispositivo conversor denominado *Merging Unit* para fornecer os dados de corrente e tensão no formato da rede IEC 61850. Um diagrama simplificado usando como exemplo o *sampled values* com o uso do barramento de processo é mostrado na FIGURA 1.

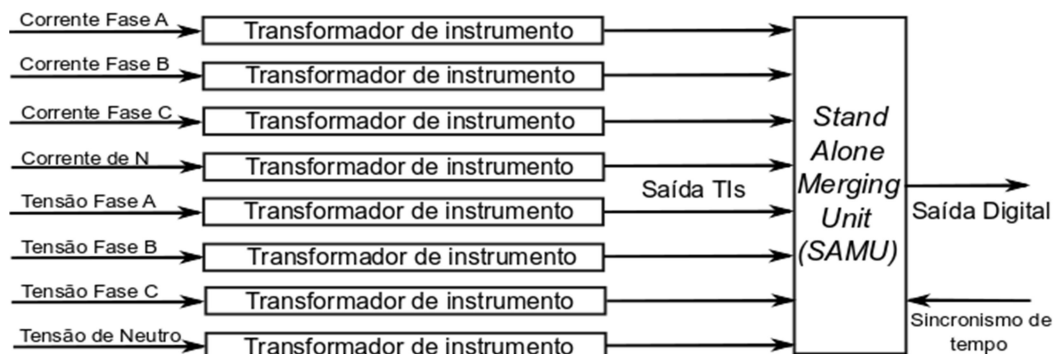


FIGURA 1 - Exemplo de conceito do uso de TIs com Merging Unit. Fonte [1]

Alguns dos benefícios do uso dos transformadores de corrente (TC) ópticos juntamente com o barramento de processo da norma IEC 61850 são, dentre outros, a redução significativa do custo da implementação do sistema devido ao fato de que as múltiplas fiações dos cabos são substituídas por um pequeno número de cabos de fibras óticas. Elimina-se a condição de circuito aberto dos TC's convencionais, e também a sua eventual saturação magnética, o que implica numa significativa melhora na segurança da subestação [2], [3].

Esta modificação será introduzida de forma gradual no sistema elétrico tanto no Brasil como também nos demais países devido ao tempo de vida dos transformadores de instrumentos convencionais (aproximadamente 30 anos), e devido ao caráter conservador dos engenheiros de proteção. Assim sendo, os transformadores de instrumentos convencionais somente serão substituídos após ao término da vida sua útil.

Os transformadores de corrente convencionais estão sujeitos à ocorrência de um fenômeno denominado saturação, que distorce a forma de onda no lado secundário, resultando em injeções de sinais incorretos nos relés, que não representam a corrente real do sistema de potência. A leitura da corrente secundária distorcida pode acarretar em alguns efeitos negativos no sistema, entre eles pode-se citar a atuação indevida de algumas funções de proteção, tais como a proteção de distância (função ANSI 21) [4], na proteção diferencial (função ANSI 87) [5], e proteção de sobrecorrente (função ANSI 51) [6].

Segundo [7], existem algumas maneiras de superar o problema da saturação de TC's e tornar possível o funcionamento correto dos dispositivos de proteção, como expresso a seguir:

- Uso de TC's com maior fator de precisão, ou seja, TC's que não saturam durante a operação no regime permanente e transitório através do aumento da secção transversal do núcleo do TC, o que implica em TC's de tamanhos elevados que não cabem nos lugares destinados para os mesmos. Em [7], o autor sugere a redução da carga do TC, o que pode ser obtido adicionando outros conjuntos de cabos em paralelo para conectar com o relé de proteção, pois reduzir metade da carga tem o mesmo impacto na saturação de dobrar a classe de precisão. Uma outra sugestão citada em [8] refere-se ao uso de taps nos TC's de forma a dobrar a relação de transformação. Este procedimento tem o impacto de quadruplicar a classe de precisão, pois aumentando em 2 vezes a relação de transformação resulta em diminuir na metade a corrente do secundário, além de dobrar a tensão do TC.
- O uso de transformadores de corrente com entreferro do tipo TPY e TPZ têm sido utilizados para propósito de proteção, pois eles evitam que ocorra saturação durante situações de altas solicitações de corrente, porém os mesmos são incomuns no sistema elétrico nacional.
- Aplicação de algoritmos de correção do sinal da corrente secundária, o que em princípio resulta em instrumento insensível ao erro (por exemplo, os algoritmos fazem medições apenas nas frações de períodos onde a transformação é correta).

Existem no mercado hoje em dia dispositivos de proteção que trabalham com as mais variadas taxas de processamento para aquisição de sinais de tensão e corrente [10], [11], [12]. O desenvolvimento de processadores cada vez mais robustos tem possibilitado o uso de taxas de amostragens cada vez mais elevadas, não obstante, os fabricantes procuram otimizar a relação entre a necessidade de taxa de amostragem e o esforço computacional.

No presente informe técnico serão apresentados os resultados do desempenho de dois métodos de detecção e um método de correção dos trechos distorcidos da forma da onda dos sinais de corrente secundária. Será avaliado o desempenho dos algoritmos quando se consideram as diferentes taxas de amostras por ciclo típicas que os relés comerciais utilizam nos algoritmos de proteção. Estes valores variam de 16 a 128, sendo que neste informe serão utilizadas somente as taxas de 32 e 64 amostras por ciclo.

A primeira parte do artigo descreve os métodos selecionados para os testes e o condicionamento dos sinais para o processamento dos algoritmos. Inicialmente os testes dos algoritmos foram implementados no MatLab para validação. Posteriormente os algoritmos foram implementados em *hardware* e simulados em malha fechada.

## 2.0 - MÉTODOS DE DETECÇÃO E RECONSTRUÇÃO

Os métodos de detecção do intervalo onde ocorre a saturação no sinal de corrente selecionados para avaliação foram propostos por Schettino et al [13], [14], [15]. O objetivo principal era desenvolver técnicas mais robustas frente a ruídos existentes nos sistemas de energia, assim como ser imune aos desvios de frequência.

O primeiro método, denominado função de primeira diferença do filtro de Lanczos de baixo ruído, consiste numa técnica de interpolação polinomial para funções discretas. O método foi proposto por Lanczos em 1956, tendo como a sua principal característica a atenuação dos ruídos inerentes às medições [13].

A equação (1) descreve o filtro primeira diferença de Lanczos, sendo "n" o índice das amostras.

$$\text{dellan}(n) = \text{is}(n) - 9.\text{is}(n - 1) + 8.\text{is}(n - 2) + 8.\text{is}(n - 3) - 9.\text{is}(n - 4) + \text{is}(n - 5) \quad (1)$$

A FIGURA 2 mostra o comportamento do filtro frente à saturação de corrente. O gráfico do filtro foi gerado através da simulação feita no MatLab com o arquivo CSV<sup>1</sup> das correntes do TC simulando faltas no RTDS. É possível identificar os instantes em que o processo de saturação se inicia e termina. O pequeno atraso é gerado pelo filtro, mas não compromete o desempenho. Mesmo nas regiões com baixa saturação o filtro identifica corretamente a região saturada.

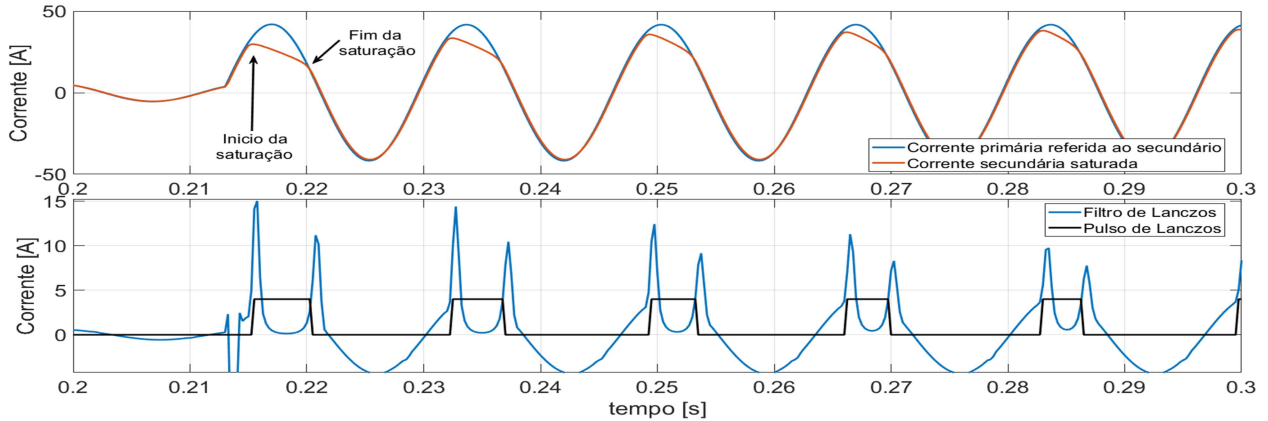


FIGURA 2 - Comportamentos do filtro de Lanczos na ocorrência de saturação de TC – MatLab (64 a/c)

O segundo método de detecção avaliado, denominado de filtro diferenciador de segunda ordem de Savitsky-Golay (SG), surgiu no ano de 1964 e a aplicação inicial deste filtro era na área química analítica. Posteriormente pesquisas foram feitas de forma a estender o uso do mesmo em outras áreas, tais como qualidade de energia e, finalmente, na área de proteção de sistemas elétricos [14].

A equação que descreve o filtro diferenciador de segunda ordem de Savitsky-Golay é descrita em (2), onde “n” indica o índice das amostras.

$$\text{del2SG} = \{5.\text{is}(n) - 3.\text{is}(n - 2) - 4.\text{is}(n - 3) - 3.\text{is}(n - 4) + 5.\text{is}(n - 6)\}/42 \quad (2)$$

A FIGURA 3 mostra o comportamento do filtro frente à saturação de corrente. O sistema teste foi simulado no RTDS e o filtro implementado no MatLab. Pode-se observar um maior atraso na detecção em relação ao filtro anterior, mas novamente, mesmo nas regiões de pouca saturação a identificação ocorre.

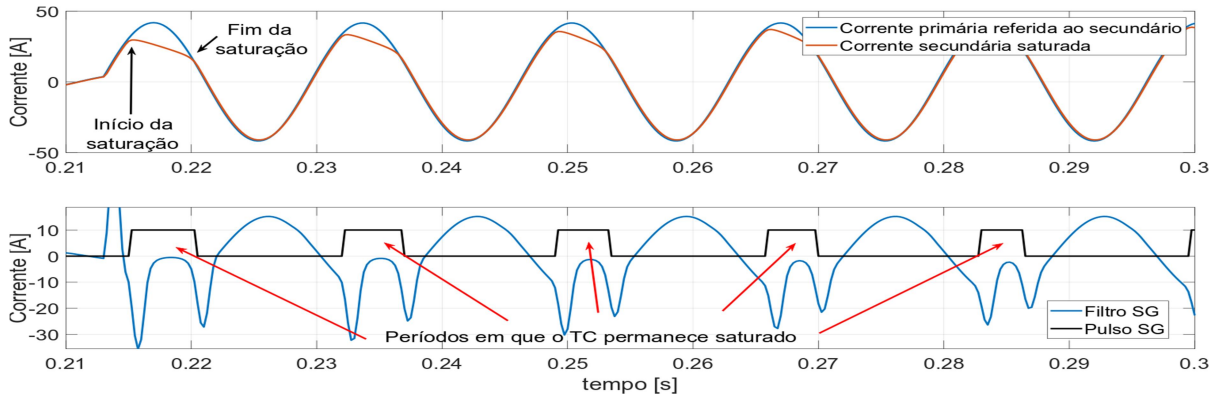


FIGURA 3 - Comportamentos do filtro de Savitzky-Golay na ocorrência de saturação de TC – MatLab (64 a/c)

Com relação ao método de compensação da forma de onda utilizado, o método de estimação por mínimos quadrados foi adotado por apresentar maior precisão frente a outros métodos de compensação da corrente secundária distorcida [15]. A equação que descreve a corrente do secundário incluindo as componentes CC (corrente contínua) do TC para a  $k$ -ésima amostra é descrita na equação (3).

$$\text{is}(k) = A.\cos((2.\pi.k)/N + \gamma) + B.e^{\lambda.k} \quad (3)$$

Aplicando algumas transformações trigonométricas e expansão em série de Taylor, pode-se chegar à seguinte equação (4).

$$\text{is}(k) \cong C_s.\sin((2.\pi.k)/N) C_c.\cos((2.\pi.k)/N) + B - \lambda.k \quad (4)$$

<sup>1</sup> Comma-separated values

Utilizando  $M$  amostras de uma região não saturada da corrente do secundário do TC é possível montar um conjunto de equações que permite obter os valores dos parâmetros  $C_s$ ,  $C_c$ ,  $B$  e  $\lambda$ . Através da equação (4) é possível reconstruir a forma de onda da corrente nas regiões onde a saturação ocorre. Os parâmetros obtidos em (5) contêm informações tanto das componentes CC quanto CA.

$$\begin{bmatrix} i_s(k_0) \\ i_s(k_1) \\ \vdots \\ i_s(k_{M-1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{2\pi k_0}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi k_0}{N}\right) & 1 & -k_0 \\ \sin\left(\frac{2\pi k_1}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi k_1}{N}\right) & 1 & -k_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin\left(\frac{2\pi k_{M-1}}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi k_{M-1}}{N}\right) & 1 & -k_{M-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_s \\ C_c \\ B \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (5)$$

A FIGURA 4 mostra a reconstrução dos trechos distorcidos da corrente secundária de um TC através do método adotado.

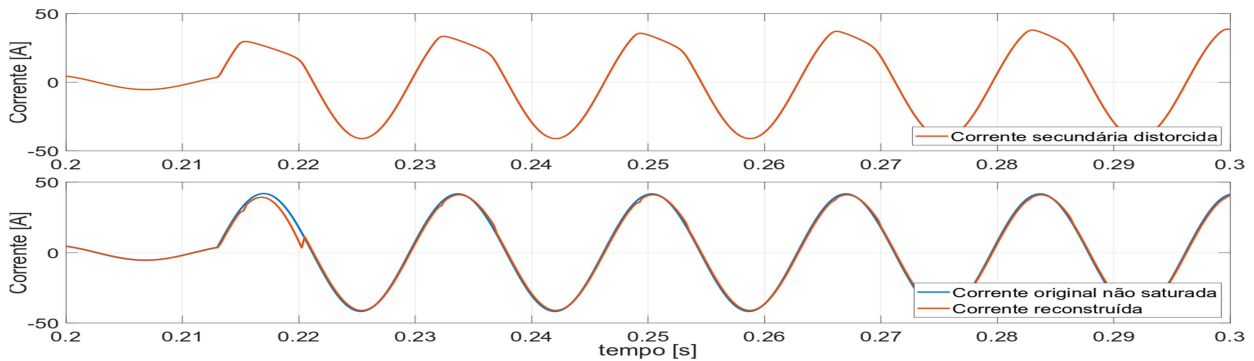


FIGURA 4 - Corrente secundária reconstruída no MatLab utilizando dados simulados no RTDS (64 a/c)

### 3.0 DESENVOLVIMENTO EM *HARDWARE*

Para a implementação dos algoritmos apresentados anteriormente em *hardware* foi necessário extrair do relé os sinais em formato bruto (*RAW data*). No presente estudo os sinais gerados no simulador em tempo real foram tratados digitalmente para serem utilizados pelos algoritmos, como mostrado na FIGURA 5. As informações contidas nas amostras desta etapa incluem as componentes CC e também as componentes harmônicas, além da componente de frequência fundamental.

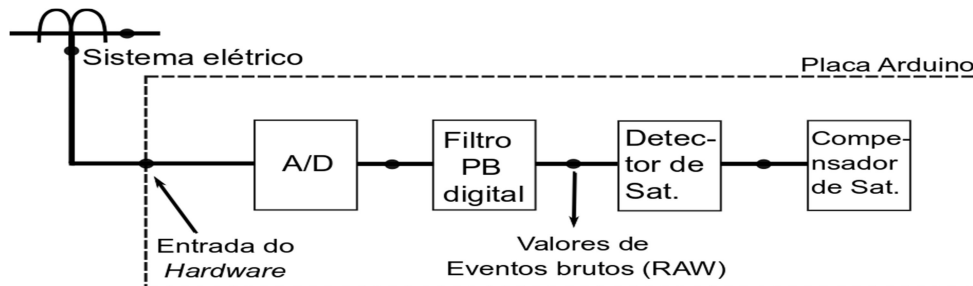


FIGURA 5 - Etapas do processamento de sinal implementado na placa Arduino (Figura adaptada de [8])

Foram testadas duas frequências de corte ( $f_c$ ) no filtro passa baixa (pb), especificamente 300 Hz e 640 Hz, variando também a taxa de amostragem do sinal, 32 e 64 a/c. O processamento do sinal de corrente com frequência de corte de 300 Hz demonstrou ter melhor desempenho em comparação com a  $f_c$  maior, no caso 640 Hz, tanto para 32 como 64 amostras/ciclo. Não foi possível realizar testes com taxa de amostragem de 128 a/c por limitações de processamento da placa utilizada.

A FIGURA 6 mostra uma comparação entre  $f_c$  diferentes aplicadas ao filtro primeira diferença de Lanczos para 64 amostras/ciclo. Pode-se observar que o filtro com a  $f_c$  de 640 Hz produziu um menor atraso em relação à  $f_c$  de 300 Hz. No entanto, a  $f_c$  de 300 Hz suavizou melhor a forma de onda em comparação com a de 640 Hz (forma de onda menos ruidosa). Esta última propriedade foi determinante para a escolha da frequência de corte de 300 Hz para o filtro passa baixa a ser utilizado no restante das simulações.

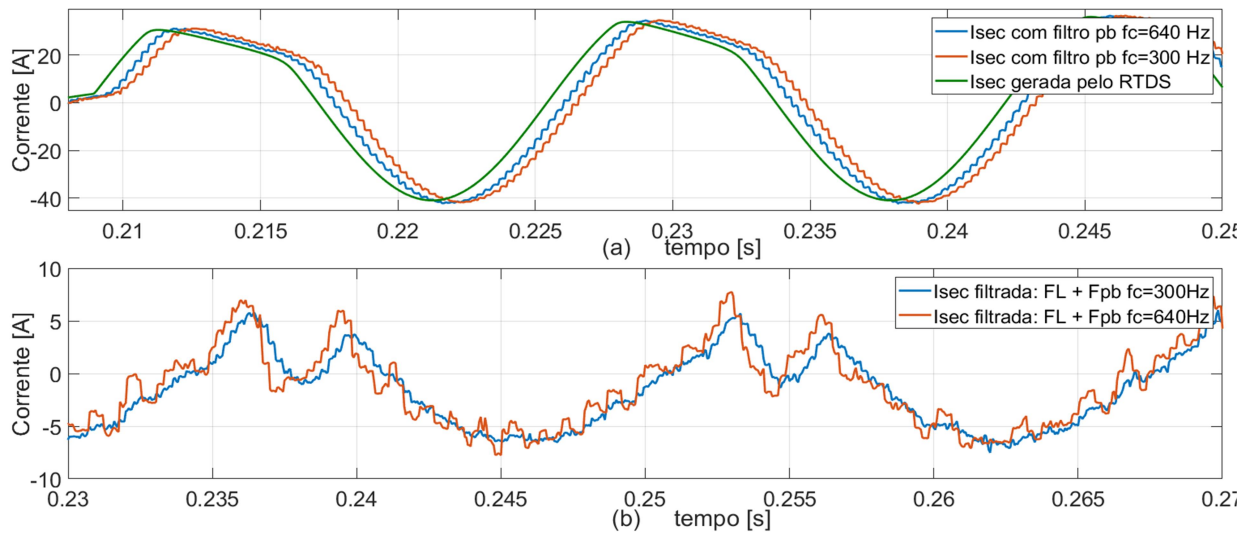


FIGURA 6 - Comparação das frequências de corte – taxa de 64 amostras por ciclo. (a) Atraso dos sinais após filtro passa baixa. (b) Atenuação do ruído após filtro de Lanczos.

A FIGURA 7 mostra o esquema montado para as simulações feitas no *hardware*.

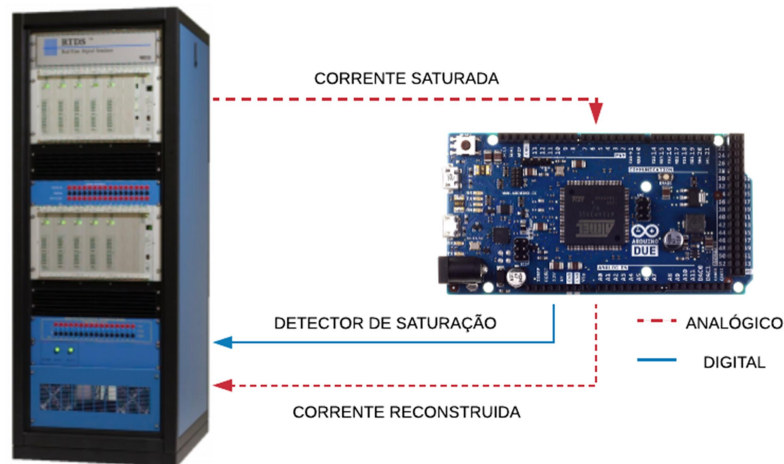


FIGURA 7 - Esquema desenvolvido para a etapa dos testes

### 3.1 Hardware

A placa de desenvolvimento Arduino, modelo Due, foi utilizada para implementar os métodos de detecção e compensação de saturação de TC. A placa possui um microcontrolador Amtel SAM3X8E ARM Cortex-M3 de 32 bits. O microcontrolador trabalha em 84 MHz (3,3 V). Esta característica o faz adequado para o processamento de algoritmos de proteção em tempo real. A placa dispõe também de uma memória flash de 512 KB que permite o armazenamento de códigos de programação extensos, 54 pinos de E/S digitais, 12 entradas analógicas e 2 saídas digitais (DAC).

O Arduino IDE é o software de programação da placa e consiste num editor de texto, compilador e comunicação via USB para carregar o programa. O software utiliza a estrutura de linguagem C (proprietária) e oferece a implementação de bibliotecas que facilitam o uso de funções pré-construídas para realizar operações matemáticas avançadas.

Como as entradas analógicas da placa trabalham na faixa de 0 a 3,3 V, fez-se necessário implementar no RTDS uma redução dos sinais para o correto processamento dos algoritmos. Adicionalmente foi implementado um limitador de tensão de forma a impedir que a saída do RTDS ultrapasse a tensão máxima de entrada da placa.

Os pinos de saídas analógicas operam num intervalo de 0,55 – 2,75 V, sendo necessário efetuar também uma transformação de escala no RTDS para a correta interpretação dos valores fornecidos pela placa.

#### 4.0 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Alguns indicadores de desempenho foram estabelecidos com o intuito de avaliar o comportamento dos algoritmos, sendo eles:

- a. **Tempo de resposta (TR):** Consiste no tempo, em milissegundos (ms), após a ocorrência da falta. Neste tempo medido encontra-se embutido os tempos de processamento do algoritmo no hardware e os atrasos gerados pelas amostras “históricas” de corrente. É importante salientar que para taxas de amostragens muito baixas o intervalo de tempo entre duas amostras consecutivas pode atingir valores que comprometem a determinação precisa dos pontos de transição, podendo inviabilizar o processo de detecção.
- b. **Erro de estimação ( $\varepsilon$ ):** Consiste na relação entre a diferença do valor eficaz da componente CA da corrente secundária estimada em relação ao valor eficaz da corrente instantânea do primário referida ao secundário.

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{reconstruida}} - I_{\text{prim\_ref\_sec}}}{I_{\text{prim\_ref\_sec}}} \cdot 100\% \quad [6]$$

Como não existem normas para identificar os níveis de saturação, neste trabalho foram definidos alguns níveis de saturação, como descrito a seguir.

**Saturação severa:** Refere-se à saturação cuja corrente distorcida ocupa menor parte do semiciclo da corrente, podendo esta ser de 50% ou menos em relação à corrente original.

**Saturação moderada:** Refere-se à saturação cuja corrente distorcida ocupa entre 50 e 70% do semiciclo da corrente original.

**Saturação leve:** Refere-se à saturação cuja corrente distorcida ocupa entre 70 a 90% do semiciclo da corrente original. Este tipo de saturação é mais comum de ocorrer nos sistemas reais.

Os detalhes das análises para alguns cenários são apresentados a seguir:

##### 4.1 Caso 1 – Falta assimétrica com saturação severa

Uma análise dos resultados obtidos para este caso, consolidados na TABELA 1, indicam um bom desempenho dos métodos de detecção. Conforme esperado, o atraso gerado pelo estágio de filtragem considerando uma  $f_c$  de 300 Hz, com frequência do sistema de 60 Hz, foi de aproximadamente de 4 amostras para o filtro de Lanczos e 5 amostras para o filtro de SG. Na FIGURA 8 é apresentado o atraso na detecção da região saturada. Com relação à reconstrução foram obtidos desvios menores em comparação à corrente original na reconstrução utilizando a detecção de Lanczos, apesar de ambos desvios poderem ser considerados pequenos. Um dos possíveis motivos desta discrepância decorre do fato do método de SG não ter detectado alguns trechos saturados considerados pequenos em relação à onda original. O sinal não tratado (secundário sem correção) apresenta um erro muito maior, mostrando a importância da reconstrução do sinal.

TABELA 1 - Resultados obtidos para o caso de falta assimétrica com saturação severa

CASO1: FALTA ASSIMÉTRICA COM SATURAÇÃO SEVERA			
	QUANT. DE AMOSTRAS/CICLO	TEMPO DE RESPOSTA (ms)	ERRO DE ESTIMAÇÃO $\varepsilon$ (%)
F. LANCZOS	64	0,94	0,54
	32	1,72	0,69
F. SG	64	1,10	6,26
	32	1,75	6,07
Secundário s/ correção	64		12,32
	32		17,29

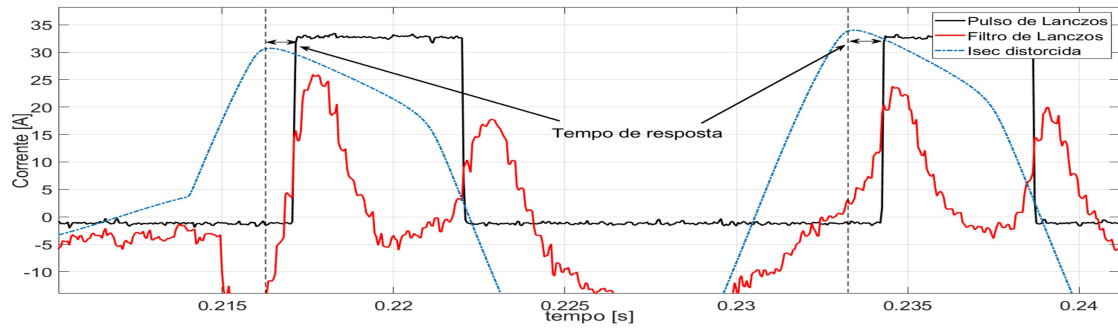


Figura 8 – Identificação do tempo de retardo para o caso do detector de Lanczos (RTDS).

#### 4.2 Caso 2 – Falta assimétrica com saturação moderada

Os dados obtidos para este caso de simulação são mostrados na TABELA 2. Como no primeiro caso, os resultados obtidos tanto para detecção quanto de compensação foram satisfatórios. É interessante ressaltar que para a quantidade de 32 amostras ciclo, para ambos os métodos de detecção, os tempos de detecção encontram-se abaixo dos valores esperados (entre 2 e 2,5 ms), resultando em excelente desempenho. Com relação aos valores obtidos na reconstrução da forma de onda, os comentários feitos para o caso anterior também são válidos para este caso.

Na FIGURA 9 é apresentado o sinal reconstruído no caso de uma saturação moderada.

TABELA 2 - Resultados obtidos para o caso de falta assimétrica com saturação moderada

CASO2: FALTA ASSIMÉTRICA COM SATURAÇÃO MODERADA			
	QUANT. DE AMOSTRAS/CICLO	TEMPO DE RESPOSTA (ms)	ERRO DE ESTIMAÇÃO $\varepsilon$ (%)
F. LANCZOS	64	0,87	0,53
	32	1,59	0,73
F. SG	64	2,3	5,03
	32	1,75	7,07
Secundária s/ correção	64		13,45
	32		15,96

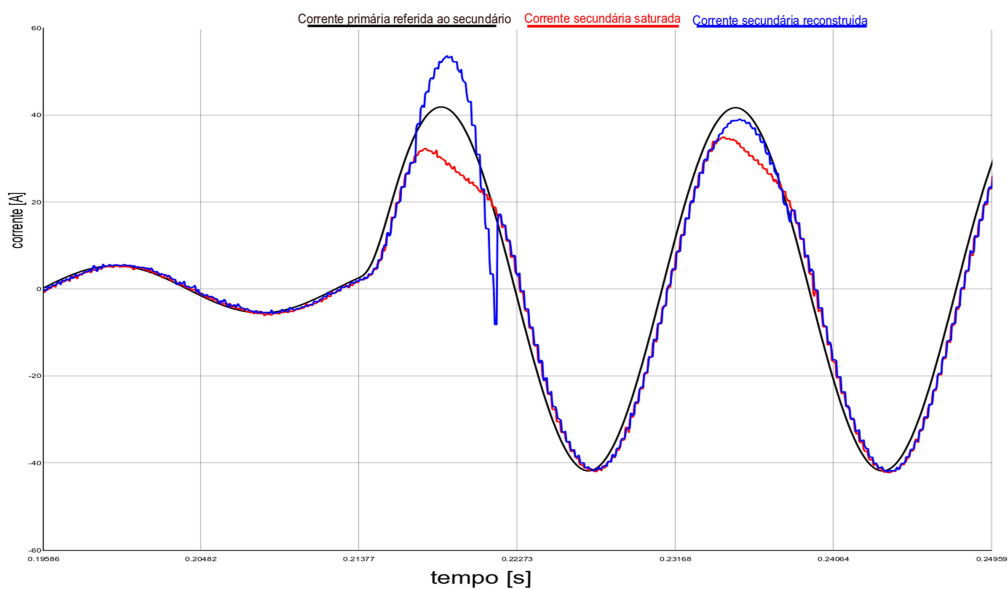


FIGURA 9 - Corrente reconstruída no RTDS para o caso de saturação moderada



#### 4.3 Caso 3 – Falta assimétrica com saturação leve

A TABELA 3 mostra os resultados obtidos para o caso de teste de falta assimétrica com saturação leve. Novamente os tempos de detecção e compensação mostraram-se satisfatórios, não havendo mudanças importantes ao se variar o grau de saturação tratado. Este resultado é relevante.

TABELA 3 - Resultados obtidos para o caso de falta assimétrica com saturação leve

CASO3: FALTA ASSIMÉTRICA COM SATURAÇÃO LEVE			
	QUANT. DE AMOSTRAS/CICLO	TEMPO DE RESPOSTA (ms)	ERRO DE ESTIMAÇÃO $\epsilon$ (%)
F. LANCZOS	64	0,98	0,54
	32	1,78	0,69
F. SG	64	1,18	5,26
	32	1,22	6,97

#### 5.0 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos nos testes implementados em *hardware* de dois métodos de detecção de saturação de TC de proteção e um método de reconstrução dos sinais secundários distorcidos. Foi verificada a influência das taxas de amostragens utilizadas por relés comerciais no desempenho dos algoritmos. Os algoritmos foram testados em diferentes cenários de saturação de corrente para verificar a eficiência dos mesmos com taxas de amostragens de 32 e 64 amostras por ciclo.

Foi verificado que uma menor frequência de corte foi mais adequada por produzir um sinal menos ruidoso, apesar de atrasar mais o sinal. Com relação à taxa de amostragem, a maior taxa resultou em menor erro, no entanto esta diferença não foi proporcional à variação da taxa, sendo muito pequena. Adicionalmente não foi possível identificar grande influência do nível da saturação no desempenho dos algoritmos.

Apesar do baixo esforço computacional dos métodos testados, o filtro primeira diferença de Lanczos demonstrou ter maior velocidade de detecção em comparação ao filtro de Savitzky-Golay. Este fato era esperado pela baixa quantidade de amostras de corrente utilizada para o processo de detecção da saturação do TC, que tem influência direta no atraso da identificação (tempo de retardo).

Com relação à compensação da corrente distorcida, o método dos mínimos quadrados apresentou uma boa precisão, pois o erro de estimação foi pequeno em relação ao sinal não distorcido. Este resultado permite, por exemplo, que a função de sobrecorrente temporizada (ANSI 51) consiga atuar de forma correta. Estudos complementares incluindo a proteção serão apresentados no futuro.

Finalmente, os testes dos métodos implementados em *hardware* do tipo malha fechada conseguem simular de forma mais realista o comportamento dos mesmos em comparação com testes realizados totalmente através de *software* (*software in the loop* - SIL). Entende-se que o SIL é importante para a fase de testes do algoritmo, mas é importante que se faça a implementação em *hardware* para verificar a eficácia do algoritmo em condições mais próximas do que será verificado em campo.

No presente estudo os diversos níveis de saturação foram obtidos variando-se as características do TC, como o *burden*, fluxo remanescente, e tipo de falta. Outros cenários de testes serão implementados e apresentados em trabalhos futuros, tais como inserção de ruído no sistema elétrico, desvios da frequência industrial. Adicionalmente outras taxas de amostragem serão utilizadas em novas placas de processamento, especificamente 128 amostras por ciclo.

#### 6.0 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedidos pelos órgãos CNPq, FAPESP (2017/20010-1) e CAPES (Código de Financiamento 001).

#### 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 61869-13 Draft BS: Instrument Transformers – Part 13: *Stand alone Merging Unit (SAMU)*
- [2] A. Apostolov. IEC 61850-9-2 *Process Bus Applications and Benefits*. 10<sup>th</sup> IET *International Conference on Developments in Power System Protection*. Manchester, UK. Ano 2010.
- [3] Dorival Kitakawa Lima. Transformadores para instrumentos ópticos: Aspectos da viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico Brasileiro, Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - Brasil. Ano 2009.
- [4] Wannous, Kinan e Petr Toman . *The impact of current transformer saturation on the distance protection*. 17th *International Scientific Conference on Electric Power Engineering*, Praga, República Checa. Ano 2016.



- [5] Dashti, H., M. Sanaye-Pasand e M. Davarpanah. *Current transformer saturation detectors for busbar differential protection*. 42<sup>nd</sup> International Universities Power Engineering Conference. Brighton, UK. Ano 2007.
- [6] Kojovic, Lj.A. *Impact of current transformer saturation on overcurrent protection operation*. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicado, IL, EUA. Ano 2002.
- [7] Waldemar Rebizant, Janusz Szafran, Andrzej Wiszniewski. *Digital Signal Processing in Power System Protection and Control*. Editora Springer-Verlag London. Ano 2011. 316 p.
- [8] Ariana Hargrave et al. *Beyond the Knee Point: A Practical Guide to CT*. 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE). College Station, TX, EUA. Ano 2018
- [9] Stephen D. Umans, Máquinas Eléctricas. 7ª Edição. Porto Alegre: Editora AMGH, Ano 2014. 708 p.
- [10] GENERAL ELECTRIC COMPANY D30 Line Distance Protection System Instruction Manual for version 7.8x. Disponível em: < <https://www.gegridsolutions.com/app/ViewFiles.aspx?prod=d30&type=3> > Acessado em 25 de janeiro de 2019.
- [11] SIEMENS SIPROTEC 5 Distance Protection, Line Differential Protection, and Overcurrent Protection for 3-Pole Tripping Manual. Disponível em: < <https://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/protection/siprotec5/pages/overview.aspx> > Acessado em 20 de fevereiro de 2019.
- [12] Schweitzer Engineering Laboratories SEL-421 RELAY Instruction Manual User's Guide. Disponível em: < <https://selinc.com/pt/literature/instruction-manuals/> >. Acessado em 03 de março de 2019.
- [13] Bruno M. Schettino et al, *A New Method of Current Transformer Saturation Detection in the Presence of Noise*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 29, n 4, pág. 1760-1767. Agosto de 2014.
- [14] Bruno M. Schettino et al, *Current Transformer Saturation Detection Using Savitzky-Golay Filter*. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 31, no 3. pág. 1400-1401. Junho de 2016.
- [15] Bruno M. Schettino et al, *Comparison of Estimation Methods for Compensating the Saturation Effects in Secondary Current of Current Transformers* - IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, EUA. Ano 2015.
- [16] Kanhaiya Kumar et al, *A New Efficient Algorithm to Detect Current Transformer Saturation*. IEEE Power & Energy Society General Meeting. Boston, MA, EUA. Ano 2016.

#### DADOS BIOGRÁFICOS



Luis Guzman Garcete Alderete: Possui graduação em Engenharia Elétrica pela *Universidad Nacional del Este-Py* (2011), trabalhou como engenheiro de aplicação para algumas empresas e atualmente é mestrando em Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), seus principais interesses são proteção de sistemas de potência, processamento digital de sinais, simulação digital em tempo real e transitórios eletromagnéticos.



Maria Cristina Tavares: Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1984), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1991) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1998). Atualmente é Professora MS5 (Livre Docente - Associada) na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Membro Senior no IEEE. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Transmissão da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: estudos de transitórios eletromagnéticos, linha de transmissão, análise de arco secundário, desenvolvimento de proteção adaptativa monopolar e tripolar, simuladores ATP, PSCAD e RTDS, e transmissão a muito longa distância, especificamente transmissão em meio comprimento de onda.



Fabiano Magrin: Atualmente é professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR. Graduou-se em engenharia elétrica em 2003, mestre em 2014 e doutor em 2017, todos pela mesma Universidade, UNICAMP. De 2003 a 2012, trabalhou como engenheiro de campo e aplicação para empresas privadas, incluindo dois fabricantes de relés. Ele também trabalhou em laboratórios em tempo real e no desenvolvimento de algoritmos de proteção. Seus principais interesses de pesquisa incluem proteção de transformadores, linhas de transmissão, linhas de transmissão muito longas e simulação digital.