

UM MÉTODO PARA MONITORAÇÃO E ANÁLISE DE ENERGIA ELÉTRICA APLICADA A PROCESSOS INDUSTRIAIS

Jaime André Back^{1*}, Leonel Pablo Tedesco¹, Rolf Fredi Molz¹

¹Programa de Pós-graduação em Sistemas e Processos Industriais, Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC), Santa Cruz do Sul – Brasil

*E-mail: jaime.back@gmail.com

ÁREA

Conhecimento como aliado às novas Tecnologias para otimização de processos

RESUMO

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado de baixo custo voltado ao gerenciamento da energia elétrica em ambientes industriais, tendo como objetivo principal desenvolver uma metodologia para o gerenciamento da energia elétrica (aquisição, análise e monitoração), através da coleta de parâmetros elétricos utilizando técnicas de processamento digital de sinais (DSP). Para esta tarefa desenvolveu-se um sistema (*hardware* e *software*) responsável pela aquisição, análise e registro dos sinais, utilizando diferentes tecnologias, como microcontroladores dsPIC e o *FriendlyARM*[®] MINI2440. Também foram implementados dois aplicativos, um utilizando o software Matlab[®] e outro (derivado do primeiro), para ser executado no dispositivo embarcado, onde foi utilizado como principal técnica, de detecção de perturbações, as Transformadas *Wavelets* Discretas. Como resultado, obteve-se um sistema completo para monitoração e análise de parâmetros elétricos, servindo como ferramenta de auxílio no gerenciamento da energia elétrica nos processos industriais.

Palavras-chave: Processamento Digital de Sinais, Transformadas *Wavelets* Discretas, Sistemas Embarcados, Eficiência Energética.

1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento econômico pelo qual passa o país tem influenciado diretamente no aquecimento do setor industrial brasileiro, se refletindo na modernização dos parques e processos industriais, os quais trazem consigo uma demanda considerável de energia elétrica. Para Junior⁹, a disponibilidade de energia elétrica representa para a população uma série de benefícios: por um lado as indústrias que cada vez mais ampliam sua infraestrutura e aumentam sua produção, gerando assim um incremento na disponibilidade de empregos; por outro lado, ela proporciona maior conforto e comodidade, gerando assim um acréscimo de qualidade de vida para a maioria das pessoas.

Desta forma, a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem se tornado uma preocupação crescente e comum às empresas de energia elétrica (concessionárias estatais, cooperativas de eletrificação) e aos consumidores de modo geral¹⁰⁻¹⁶. Este interesse pela QEE deve-se principalmente à evolução tecnológica dos equipamentos eletroeletrônicos, amplamente utilizados nos diversos segmentos da indústria, como por exemplo, a aplicação da eletrônica de potência, a automação de processos e a conversão de energia CA/CC (de CA – Corrente Alternada para CC – Corrente Contínua).

Já a Eficiência Energética (EE) representa as atividades socioeconômicas que objetivam proporcionar um melhor consumo de energia (seja ela hídrica, elétrica, ou combustíveis fósseis). Portanto, buscar alternativas e melhorar a eficiência dos processos industriais são para os gestores industriais, mais do que uma necessidade; é questão de sobrevivência no mercado^{7,14,15}. A redução do consumo de energia, além de ser ação ambiental de preservação do meio natural, uma vez que representa a redução da necessidade de ampliação da oferta, também proporciona retorno financeiro para as empresas.

Neste contexto, torna-se importante que as indústrias tenham um gerenciamento eficaz das demandas energéticas consumidas diariamente, evitando tanto o desperdício de energia quanto a diminuição da qualidade da mesma. Assim, tendo em vista que a QEE pode chegar ao consumidor com um excelente padrão de qualidade, porém seu mau gerenciamento, ou problemas decorrentes da própria infraestrutura da empresa, podem implicar na diminuição da qualidade da energia consumida no processo industrial.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O termo qualidade de energia elétrica é utilizado para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores². Essa medida inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura, tanto do sistema supridor como das cargas elétricas.

Em termos gerais, a QEE possui três níveis de qualidade, a saber: qualidade do atendimento, qualidade do serviço e qualidade do produto. A qualidade no atendimento refere-se às cobranças indevidas, taxas, tempo de atendimento entre outros. A qualidade no serviço esta relacionada à operação e manutenção do sistema elétrico, proporcionando para os clientes o mínimo de interrupção aceitável. Já a qualidade no produto possui um foco técnico, que diz respeito à conformidade do produto, ou seja, a disponibilidade de energia elétrica com tensões senoidais equilibradas e com amplitude constante^{3,5,7}.

2.1 Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica

Conforme Deckmann² é necessário que os técnicos ou especialistas façam uma pesquisa (estudo) para diagnosticar as causas dos problemas relativos à qualidade da energia. Como se trata de diagnosticar um problema de compatibilidade eletromagnética ou a busca por indicadores de parâmetros elétricos fora de padrões, essa pesquisa pode envolver questões que vão além de um simples problema tecnológico. Uma abordagem recomendável incluiria os seguintes passos:

- Em primeiro lugar devem-se conhecer os problemas que se poderá enfrentar;
- Devem-se estudar as condições locais onde o problema se manifesta;
- Se possível medir e registrar as grandezas contendo os sintomas do problema;
- Analisar os dados e confrontar os resultados obtidos com estudos ou simulações;
- Finalmente diagnosticar o problema, sua possível causa e propor soluções.

Portanto, a QEE se refere a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos conduzidos que caracterizam a tensão e a corrente num dado tempo e local do sistema elétrico. Assim, conforme os autores^{2,5,16} a qualidade da energia em uma determinada região do sistema elétrico é adversamente afetada por uma ampla variedade de distúrbios, como:

- Transitórios (impulsivos e oscilatórios);
- Variações de curta duração (interrupções transitórias, afundamentos de tensão e saltos de tensão);
- Variações de longa duração (interrupções sustentadas, subtensões e sobretensões);
- Distorção de forma de onda (corte de tensão, harmônicos, ruído, etc.);
- Flutuações de tensão, desequilíbrios e variações de frequência.

2.2 Principais métodos utilizados na identificação de parâmetros de QEE

Para Ferreira⁵, a identificação e classificação de distúrbios elétricos consiste em uma importante etapa num processo de monitoramento da QEE, uma vez que pode contribuir diretamente na identificação das causas dos distúrbios.

Conforme Garcia⁷, para a identificação de um distúrbio elétrico são necessárias funções ou algoritmos que permitem extrair parâmetros que caracterizam estes eventos. Conforme os autores^{4,7,13}, os seguintes métodos para identificação de distúrbios são utilizados:

- Método baseado no cálculo do Valor RMS;
- Método baseado na Norma Euclidiana Instantânea;
- Método baseado na aplicação da Transformada Discreta de *Fourier*;
- Método baseado na aplicação da Transformada *Wavelet*.

A Transformada *Wavelet* é utilizada quando se necessita localizar eventos isolados no domínio do tempo⁸, visto que o método clássico de análise de espectro de frequência usando a Transformada de *Fourier* é adequado para sinais periódicos em regime permanente. A Transformada *Wavelet* possui suas variantes contínua (TWC) e discreta (TWD).

2.3 A Transformada *Wavelet* – Análise Multiressolução

Para Ferreira⁵, o efeito da mudança de escala de um sinal pode ser melhor interpretado usando-se o conceito de resolução, sendo isto conseguido utilizando filtros. O processo de filtragem utilizado para a TWD apresenta uma forma de realização da técnica de Análise Multiressolução (AMR) proposta por Mallat, tendo como resultado a combinação de uma função de escala $f_{(t)}$ e de uma função *wavelet* $\psi_{(t)}$.

Conforme Filho⁶ e Garcia⁷, é possível separar componentes de frequência dos sinais utilizando os filtros de decomposição *wavelet*. Este processo baseia-se na filtragem de um sinal através de filtros passa-alta e passa-baixa, fornecendo versões do sinal original relativas aos coeficientes de funções *wavelets* e funções escala, ou aproximações e detalhes¹¹, respectivamente.

De acordo com Misiti¹¹, a TWD utiliza filtros de decomposição dos sinais que separam os componentes de alta frequência (detalhes) e os componentes de baixa frequência (aproximações), conforme ilustra a Figura 1.

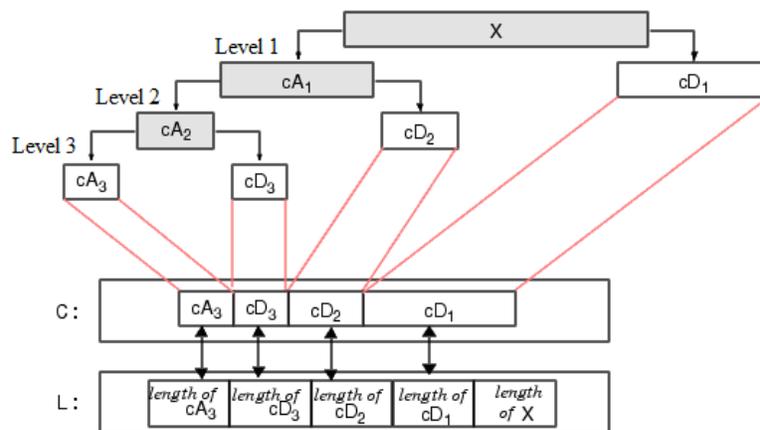


Figure 1: Árvore de decomposição *Wavelet* até o nível 3

Fonte: MISITI¹¹ e FERREIRA⁵

3 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos de desenvolver um equipamento (e uma metodologia) voltado ao gerenciamento eficaz das demandas e assim aumentar a economia de energia elétrica, este projeto foi dividido em quatro fases, sendo elas:

A primeira etapa compreendeu a análise das soluções existentes no mercado, bem como dos estudos realizados no cenário atual de EE. Nesta fase também foi executado o levantamento de referencial teórico, principalmente no que se refere ao estudo das Transformadas *Wavelets*.

Na segunda etapa, foi desenvolvido o sistema de aquisição e análise de dados provenientes do sistema de fornecimento de energia elétrica. Esta etapa compreende o projeto e dimensionamento das placas eletrônicas de condicionamento de sinais, das placas de aquisição e discretização dos dados e a programação dos sistemas embarcados.

A terceira etapa correspondeu à instalação e calibração do sistema de aquisição no ambiente industrial. Este sistema permaneceu em funcionamento durante cinco semanas, onde coletou parâmetros de tensão e corrente de 3 transformadores, com capacidade de até 1000 Ampères cada.

Na quarta e última etapa, os dados coletados pelo sistema foram analisados, podendo assim ser desenvolvido o modelo de consumo e também foi implementada uma aplicação computacional para detecção e classificação dos distúrbios elétricos.

3.1 Implementação do sistema de aquisição

Como proposto no artigo de Back¹, a aquisição dos parâmetros elétricos pode ser realizada com a utilização de transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial (TP) conectados à rede elétrica (correspondendo à etapa de entrada de sinal). Este sinal é condicionado para atingir faixas de valor específicos e dentro dos limites do conversor analógico digital (ADC) utilizado no processamento destes sinais. Como saída tem-se um sinal digitalizado, ou valor discretizado, podendo assim ser manipulado computacionalmente.

A Figura 2 apresenta o cenário de estudos e descreve mais detalhadamente a segunda e terceira etapas, em que é possível observar os sinais senoidais de entrada (SINAL DO BARRAMENTO), que são capturados pelos sensores (LEITURA) e posteriormente condicionados de forma a se ter dois sinais distintos: um sinal retificado e um sinal digital (CONDICIONAMENTO). Ambos sinais são lidos pelo circuito DSP (dsPIC30F), discretizados e enviados ao sistema embarcado (MINI2440) para serem visualizados pelo usuário (DISCRETIZAÇÃO).

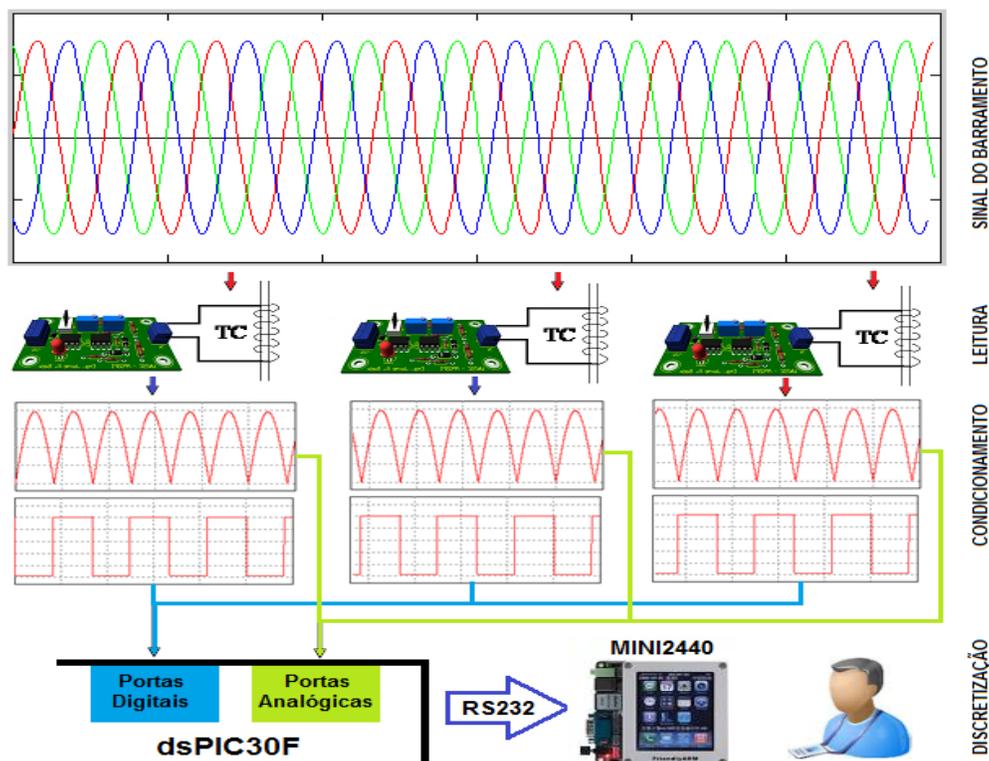


Figure 2: Fluxo de sinais no cenário de estudo

A última etapa do desenvolvimento do sistema corresponde à integração de todos os dispositivos já desenvolvidos neste projeto. Para iniciar a monitoração de um sistema de produção trifásico, no mínimo necessita-se de um MINI2440, uma placa microcontrolada, condicionadores para os sinais dos TCs, condicionadores para os sinais dos TPs, uma fonte de alimentação e um conversor para comunicação entre os dispositivos.

Como o cenário de estudos envolve a coleta de dados de diferentes pontos (vários transformadores), foi necessário a instalação de diferentes equipamentos de coleta em cada um dos pontos que se desejava efetuar a captura de informações. Por fim, os dados discretizados são enviados a um único MINI2440 e posteriormente armazenados, de forma a centralizar o registro de informações em uma única plataforma embarcada. A integração do sistema de aquisição é apresentada pela Figura 3.

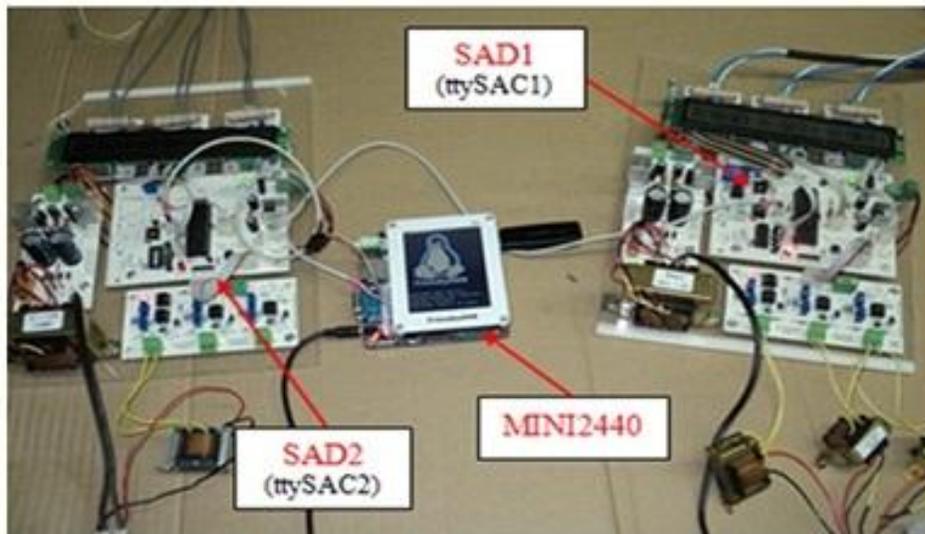


Figure 3: Integração do sistema de aquisição de dados (sistema embarcado)

3.2 Algoritmo AMR embarcado

O desenvolvimento de um algoritmo para análise de perturbações por TWD foi necessário neste projeto como alternativa à utilização de software proprietários (como o Matlab, por exemplo), além da necessidade de se ter o algoritmo disponível para a plataforma embarcada.

Uma forma prática de realizar a AMR é através do algoritmo piramidal de Mallat (FIGURA 1.b), que consiste em dividir o sinal original em dois: um é o sinal original suavizado e outro uma ampliação das oscilações ou “ruídos” do sinal analisado.

Para a implementação do algoritmo embarcado, o fluxograma apresentado na Figura 4 teve que ser seguido. Neste fluxograma, a função de Haar é aplicada ao sinal S e dois subsinais são gerados. O sinal $H(s)$ representa os coeficientes *wavelet* resultantes da aplicação da Transformada *Wavelet* Haar.

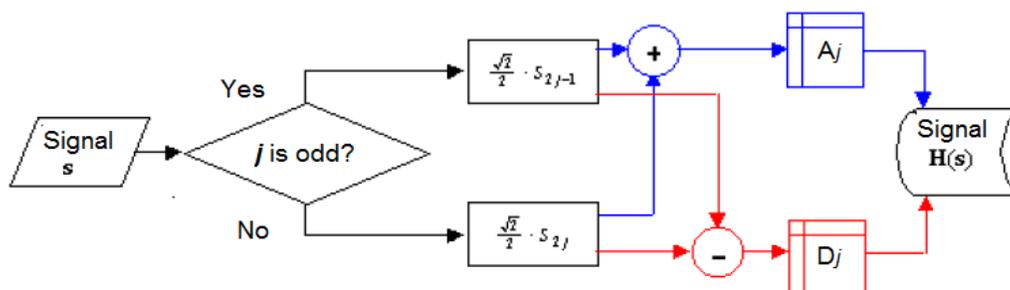


Figure 4: Análise de elevação de tensão por TWD
 Fonte: Adaptado de Pazos¹¹

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para validação do projeto desenvolvido, como estudo de caso foi executado o monitoramento da qualidade da energia elétrica bem como da demanda energética consumida em um processo de beneficiamento de tabaco. Escolheu-se este cenário de estudos pelo alto consumo de energia em seus processos, além da grande quantidade de elementos de potência instalados, como motores de indução trifásicos, caldeiras, reatores, entre outros.

Assim o processo em que o sistema de monitoramento foi instalado corresponde a linha de beneficiamento de fumo, e se caracteriza pelas seguintes cargas elétricas (cargas de maior relevância):

- Total de 280 motores de indução, sendo na maioria motores trifásicos;
- 250 motores são acionados por partida direta;
- 30 motores são controlados por inversores de frequência.

4.1 Análise de Consumo

Esta etapa correspondeu à verificação do comportamento do consumo de energia elétrica pelo sistema e sua eficiência. Os dados a serem analisados correspondem ao valor de corrente consumida em cada fase dos transformadores monitorados pelo sistema de aquisição de dados. O sistema implementado monitorou o processo industrial por aproximadamente um mês, e neste período, a empresa operou em turno único, com horário de funcionamento das 6:20 horas até 13:30 horas.

Os dados coletados neste período permitiram a verificação da QEE bem como traçar o modelo de consumo (EE) do processo. Por exemplo, a Figura 5 demonstra o comportamento da demanda energética monitorada e registrada durante um dia de produção. Nesta imagem é possível observar a similaridade entre as três curvas, que representam a demanda de três transformadores da subestação.

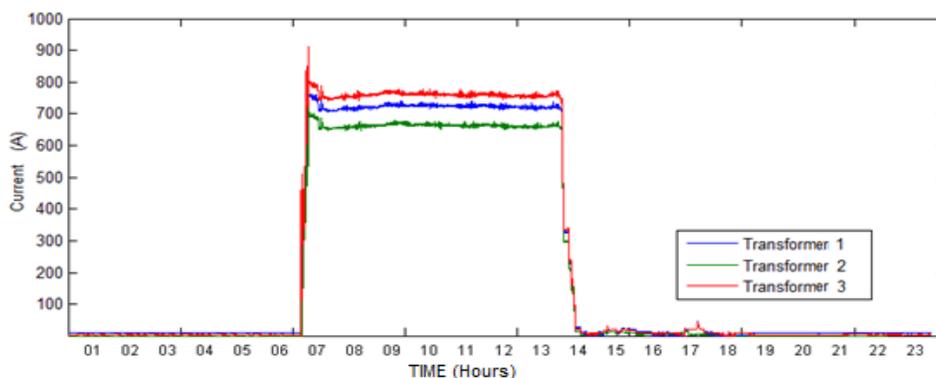


Figure 5: Gráfico com as correntes IR de três transformadores

4.2 Análise de padrões de QEE e EE

Os parâmetros de QEE na corrente elétrica também afetam os padrões de EE e devem ser considerados em todos os processos de análise e monitoração. Neste trabalho essas perturbações foram analisadas a partir dos valores de consumo médio, ou seja, valores de corrente RMS (I_{rms}) para cada uma das fases dos transformadores.

Estas perturbações correspondem a eventos abruptos, que ocorrem instantaneamente, modificando o comportamento e a curva de consumo do sistema. Pode-se citar como exemplo o acionamento de grandes cargas, como motores de indução por partida direta, gerando picos de corrente várias vezes a corrente nominal. Da mesma forma, o desligamento de dispositivos também causa diminuição repentina da corrente, ou afundamentos.

A Figura 6.a apresenta a curva de consumo diário do processo industrial onde é possível observar o acionamento das cargas até a estabilização do processo, com demanda de corrente próxima a 800 Ampères e duração de aproximadamente 9 horas.

Nesta curva é possível observar um afundamento na corrente, causado pelo desligamento repentino dos equipamentos e máquinas da linha de produção devido a uma sobre-tensão (quadro em detalhe da FIGURA 6.a) em que a tensão nominal da rede chegou a 245 Volts.

Com base nesta curva de consumo, é aplicada a TWD de modo a localizar os distúrbios de corrente. Como resultado tem-se o gráfico de espectro *wavelet* (Figura 6.b), correspondendo ao ruído presente na curva de consumo após a análise utilizando *wavelet* mãe de Haar. Para esta análise, os pontos mais importantes do gráfico são os saltos de maior amplitude, que indicam os momentos em que houve mudanças abruptas na curva de consumo.

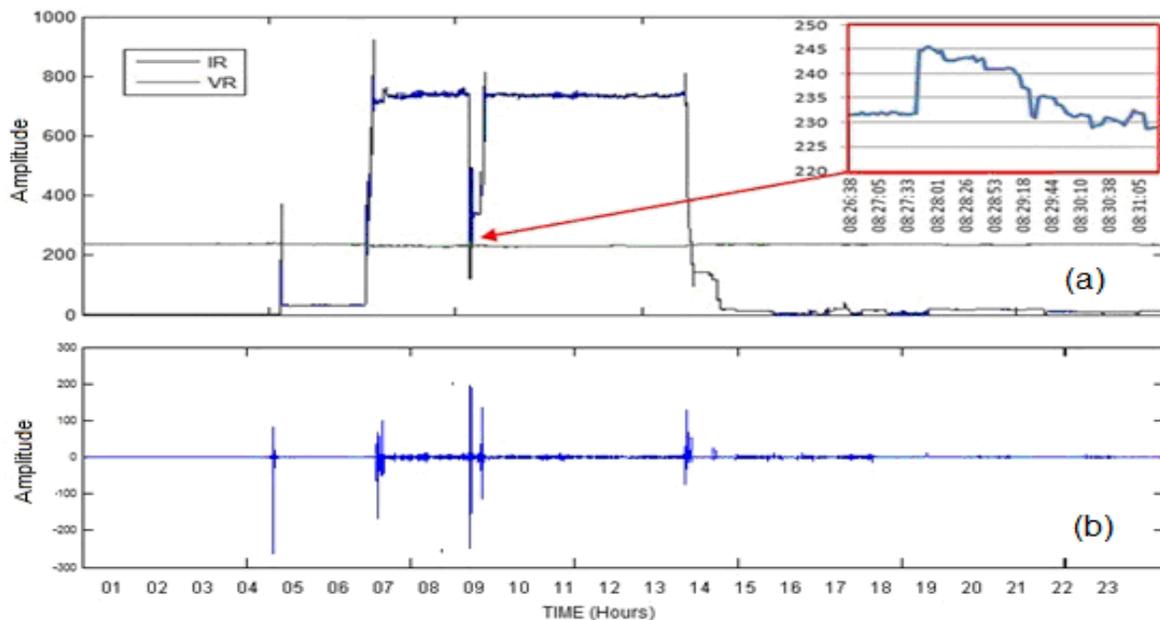


Figure 6: (a) Análise de perturbação. (b) Aplicação da TWD Haar

Ainda com base na Figura 6.a, nota-se o tempo necessário para a reestabilização do processo, ou seja, o tempo necessário para o que comportamento da curva de consumo se ajuste ao seu modelo característica (próxima de 800 A). Neste período, que teve duração de aproximadamente 40 minutos, funcionários foram obrigados a parar suas atividades, sendo que o tabaco não pode ser beneficiado.

Já a análise de perturbações de QEE dos dados de tensão senoidal coletados pelo sistema embarcado (para uma única fase) pode ser visualizada na Figura 7. Nesta figura é possível observar a mudança no nível de espectro *wavelet* no momento em que a amplitude da senoide se eleva repentinamente (elevação de tensão de curta duração). Este impulso na resposta do espectro corresponde aos coeficientes de detalhe quando inserido uma perturbação no sinal original e são facilmente detectados pela função *wavelet* devido sua característica de análise no domínio do tempo.

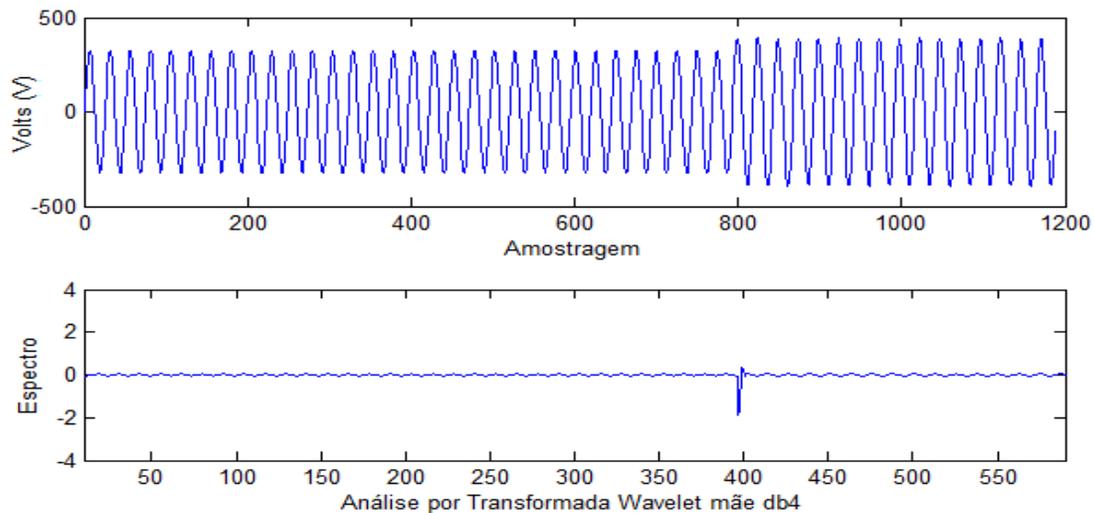


Figure 7: Análise de elevação de tensão por TWD

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho apresentaram-se os resultados alcançados com o desenvolvimento de um sistema embarcado voltado ao gerenciamento da energia elétrica em processos industriais. A partir da análise dos dados coletados foi possível observar que a integração de diferentes tecnologias, associadas a metodologias e técnicas de captura e análise de sinais, resultam em ferramentas capazes de auxiliar na monitoração e no gerenciamento das demandas energéticas no setor industrial.

A análise da demanda consumida (demanda total, por área, setor, horário) pode fornecer o modelo de consumo parcial, porém capaz de ilustrar o comportamento do consumo elétrico do processo industrial. O algoritmo desenvolvido para a análise de demanda possibilita, além da verificação da demanda consumida, a criação de perfis de consumo para cada dia ou semana, de forma a estimar picos de consumo, evitando assim ultrapassar a demanda contratada.

Para trabalhos futuros, deseja-se aprimorar o armazenamento dos dados a partir de um banco de dados mais robusto, tornando essas informações acessíveis a qualquer sistema de gestão. Também deseja-se executar a leitura de dados de consumo diretamente pelo MINI2440, sem a necessidade da utilização de microcontroladores. Por fim, será necessário implementar novas rotinas de análise AMR utilizando *wavelet* mãe Daubechies (db4), em virtude de que a Haar não obteve resultados satisfatórios para a análise de QEE em tempo real (para sinais senoidais).

6 REFERÊNCIAS

1. BACK, J. A.; TEDESCO, L. P. Proposta de um Sistema para Monitoração e Análise de Energia Elétrica em Ambientes Industriais. In: XXXII ENEGEP (Encontro Nacional de Engenharia de Produção), Bento Gonçalves - RS, 2012.
2. DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. Material Didático – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Unicamp, Campinas, 2010. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a1.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2011.
3. DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. Electrical Power Systems Quality. 2nd ed., New York: McGraw Hill, 2003. 528 p.
4. DUQUE, C. A., RIBEIRO, M. V., RAMOS, F. R., et al. Power Quality Event Detection Based on the Divide and Conquer Principle and Innovation Concept. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 4, pp. 2361 – 2369, 2005.
5. FERREIRA, J. C. Utilização da Transformada de Wavelet para Detectar Variações Anormais de Frequência em Sistemas de Geração Distribuída. 2009. 191 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2009.
6. FILHO, O. D. Utilização da transformada wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica. 2003. Dissertação de Mestrado. USP São Carlos, 2003.
7. GARCIA, V. V.; KAGAN, E. L.; AMASIFEN, J. C. C.; SUEMATSU, A. K.; HAYASHI, R.; CHAVES, L. B. Sistema de Consultoria de Qualidade de Energia Elétrica. In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC. Anais do VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto, 2009.
8. HUA, L.; BUAGUN, Z.; HONG, Z., Recognition and Classification of Power Quality Event in Power System Using Wavelet Transform. Proceedings of 27th Chinese Control Conference, pp. 43-46, 2008.
9. JUNIOR, O. H. A. Desenvolvimento de uma Metodologia para Identificar e Quantificar Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica. 2009. 188 p. Dissertação de Mestrado (PPGEE-UFRGS), Porto Alegre, 2009.
10. LEBORGNE, R. Uma Contribuição à Caracterização da Sensibilidade de Processos Industriais Frente a Afundamentos de Tensão. 2003. 163 p. Dissertação de Mestrado (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.
11. MISITI, M., MISITI, Y., OPPENHEIM, G., POGGI, J. Wavelet Toolbox For Use with MATLAB®. User's Guide, Revised for Version 4.10 (Release 2012b), The MathWorks, Inc., 2012.
12. PAZOS, R. P. Transformada Wavelet Haar. UNISC. 2006. Disponível em: <http://rpanta.com/downloads/material/271006_RPP_DSP04.pdf>. Acesso em: 21 de dez. 2012.
13. SANTOSO, S.; GRADY, W. M.; POWERS, E. J.; et al. Characterization of distribution power quality events with Fourier and wavelet transforms. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, pp. 247–254, 2000.
14. SILVA, C. R. C.; DESCHAMPS, E.; PÉRES, A. Eficiência Energética na Indústria. In: VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2009, Blumenau - SC. Anais do VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Agosto, 2009.
15. SOLA, A. V. H.; KOVALESKI, J. L. Eficiência energética nas indústrias: cenários & oportunidades. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Anais / XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Florianópolis, SC: UFSC. ISBN 85-88478-11-0, 2004.
16. SOLÓRZANO, K. M. L. Uma Contribuição ao Estudo de Sobretensões em Sistemas Elétricos de Pequeno Porte Contendo Cargas Não - Lineares. 103 p. Dissertação de Mestrado (CPG-E), Universidade Federal de Itajubá, 2004.