



## **GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS - GTL**

### **MINERAÇÃO DE DADOS PARA DETECÇÃO DE ANOMALIAS EM REGULADORES DE VELOCIDADE DE USINAS HIDRELÉTRICAS**

**CLAUDIO AUGUSTO GOMES SILVA MOTA; FILIPE VENTURA MUGGIATI(1); GUILHERME LUIZ GOMES SILVA MOTA  
ITAIPU (1)**

#### **RESUMO**

A unidade geradora é o conjunto de equipamentos elétricos e mecânicos destinados à geração de energia. Por isso, este conjunto é o foco das ações de operação e manutenção em empresas deste setor. Dentre os principais equipamentos, tem-se o regulador de velocidade, responsável pelo controle da admissão à turbina. Este equipamento pode apresentar falhas que comprometem o funcionamento da unidade geradora. Assim, em Itaipu, desenvolveram-se algoritmos baseados em mineração de dados para identificar falhas no regulador de velocidade. Este trabalho apresenta os resultados da aplicação da transformada Wavelet nas séries temporais da pressão hidráulica do regulador para detecção de anomalias.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Unidades Geradoras, Reguladores de Velocidade, Mineração de Dados e Transformada Wavelet.

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

A Usina Hidrelétrica de Itaipu é um empreendimento binacional fruto do acordo celebrado em abril de 1973, entre Brasil e Paraguai (Tratado de Itaipu), para o aproveitamento dos recursos hidráulicos do rio Paraná pertencentes em condomínio aos dois países, no trecho “desde e inclusive o Salto de Sete Quedas até a foz do rio Iguaçu”. Atualmente, a Usina de Itaipu é responsável por, aproximadamente, 11% da energia elétrica consumida no sistema elétrico brasileiro e 89% da energia elétrica consumida pelo Paraguai (ITAIPU BINACIONAL, 2020).

A unidade geradora de uma usina hidrelétrica típica, é o conjunto de equipamentos elétricos e mecânicos destinados à geração da energia elétrica. Assim, este conjunto é o ponto focal das principais ações de operação, manutenção e engenharia dentro de uma empresa de geração de energia elétrica. Na Usina Hidrelétrica de Itaipu, por exemplo, o principal foco das equipes de trabalho são as vinte unidades geradoras que totalizam a potência instalada da usina (14.000MW).

Desse modo, cada uma das unidades geradoras possui equipamentos associados com as mais diversas funcionalidades. Um dos principais equipamentos envolvidos no processo de geração é o regulador de velocidade. O regulador de velocidade é um sistema eletromecânico constituído por bombas hidráulicas, válvulas, pressostatos, circuitos de óleo e de ar comprimido comandados por um sistema eletrônico (no caso de Itaipu Binacional) e que tem como objetivo controlar a admissão de água na turbina e, através dessa ação, tornar possível a geração e o controle da potência ativa produzida pelo gerador elétrico.

Devido a complexidade do sistema do regulador de velocidade, diversas falhas elétricas ou mecânicas podem ocorrer durante a operação normal da unidade geradora. Essas falhas geralmente acarretam a desconexão imediata da unidade geradora do sistema elétrico, fato que, em momentos em que o sistema elétrico esteja em condições desfavoráveis, pode acarretar complicações no atendimento à carga. Dessa forma, a detecção incipiente de falhas nesse sistema resulta em intervenções programadas para horários de menor impacto ao sistema elétrico, em menor custo e em menor risco para o equipamento e para a instalação.

Por conta da sua importância, toda a operação do sistema regulador de velocidade é registrada em um banco de dados histórico de séries temporais. Neste contexto, a operação da Usina Hidrelétrica de Itaipu dispõe de uma plataforma que permite a construção de modelos computacionais a partir da aplicação de algoritmos de mineração de dados nestes dados históricos operacionais, destinados à identificação de anomalias e suporte à supervisão [9].

Essa ferramenta disponibiliza, através de uma interface gráfica, o controle da execução das etapas envolvidas na aplicação das técnicas de mineração de dados. Permite, por exemplo, que o usuário configure o modo de extração dos dados, realize a execução do treinamento para a construção do modelo e habilite a execução periódica da coleta e processamento de novos dados. Os dados utilizados como entradas podem ser indicações de estado, bem como grandezas analógicas históricas oriundas do sistema Scada. Como saídas do processo de mineração de dados, realiza-se a classificação de dados como 'normais' ou 'anomalias'.

Este trabalho apresenta especificamente a proposta e implementação, na plataforma existente, de novos algoritmos para as etapas de pré-processamento e classificação dos dados, avaliando seus resultados na detecção de falhas e comparando com outros algoritmos. Para isto, foi considerado um algoritmo baseado em transformada wavelet e verificada a capacidade desse algoritmo de agregar acurácia à identificação de falhas elétricas ou mecânicas no regulador de velocidade.

Finalmente, para atingir o objetivo de retratar o trabalho executado até o presente momento, este Informe Técnico está dividido nas seguintes seções: (1) Introdução, (2) Contextualização, (3) Aplicação e (4) Resultados Obtidos e Conclusões.

## 2.0 CONTEXTUALIZAÇÃO

De modo a estabelecer os conceitos necessários para compreensão do trabalho, esta seção visa informar sobre os seguintes temas: (1) o regulador de velocidade e sua importância no contexto de produção de energia elétrica, (2) a obtenção das transformadas no domínio da frequência (nesse caso, transformadas wavelet) a partir de séries temporais e o uso dessas transformadas na identificação de condições adversas ou falhas em sistemas e (3) o uso de técnicas de análise de dados no contexto de empresas do setor elétrico.

### 2.1 Regulador de Velocidade

A grande maioria da geração de energia elétrica mundial é fornecida através de geradores síncronos movimentados por máquinas primárias (turbinas). A movimentação das máquinas primárias, independente da força motriz (térmicas ou hidráulicas), deve ser passível de controle visando manter a frequência de rotação dentro de faixa de valores estabelecidos.

Esses valores estabelecidos são importantes, dentre outros motivos, por duas razões principais: (1) a frequência de rotação do conjunto girante está diretamente relacionada à frequência elétrica gerada, portanto a manutenção da frequência de rotação faz com que a frequência elétrica também permaneça dentro dos parâmetros de qualidade de energia elétrica; e (2) mecanicamente, a máquina primária é projetada para um rendimento ótimo em dada rotação bem como seus componentes são calculados para suportar esforços mecânicos nessa condição (SOUSA, 1983).

Tradicionalmente, em turbinas do tipo Francis, o controle de velocidade é realizado através de um contínuo posicionamento de pás diretrizes. Estas pás, normalmente, são acionadas através de um anel distribuidor. A função do regulador de velocidade, portanto, é atuar sobre o anel distribuidor de modo a abrir ou fechar as pás diretrizes diante de exigências sistêmicas. Como os típicos sistemas de controle, um regulador de velocidade é composto por duas partes principais: (1) um circuito eletrônico ou digital comparador de frequência que atua como cérebro do processo; e (2) um sistema hidráulico com óleo mineral ou pneumático que atua como atuador mecânico ou planta.

O primeiro possui a função de efetuar a comparação entre as frequências elétricas do sistema e do gerador de modo a fornecer o sinal de erro para o atuador mecânico. O sistema mecânico, por sua vez, ao receber o sinal de erro pressuriza o anel distribuidor de tal modo a movimentar as palhetas diretrizes para aumentar ou diminuir a velocidade da máquina primária compensando o erro observado pelo comparador. Assim, o sistema mecânico deve trabalhar sob pressão constante mantida através de três bombas hidráulicas. Essas bombas possuem um ciclo de partida e parada de modo a manter a pressão do sistema em valores de pressão próximos ao nominal (61 bar). A perda de pressão do sistema se dá ininterruptamente diante da necessidade de manobras, mesmo que mínimas, no anel distribuidor para o controle da frequência do conjunto girante. Dessa forma, a série temporal que representa o comportamento normal da pressão do sistema de regulação de velocidade pode ser visualizada na Figura 1.

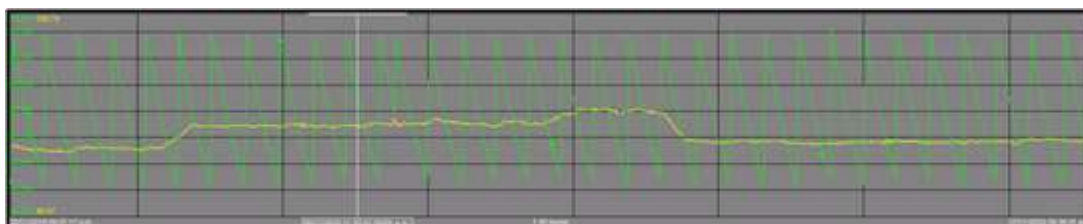


FIGURA 1 – Série Temporal do comportamento normal da pressão do sistema de regulação de velocidade.

Em condições normais de operação, a série temporal apresenta um comportamento oscilatório regular. Porém, em determinadas circunstâncias anômalas, quer por problemas no circuito eletrônico ou por defeitos no sistema mecânico, a série temporal tem uma alteração significativa – como apresentada na Figura 2. Essa alteração indica uma falha no sistema que, em diversas situações, passa despercebida à supervisão do equipamento. Essa falha oculta evolui até que sejam detectadas manobras involuntárias do anel distribuidor e, por conseguinte, das palhetas diretrizes e da potência elétrica gerada, pelas equipes de supervisão do equipamento. No momento da detecção dessas manobras involuntárias, a unidade geradora tem que ser desligada para intervenção.

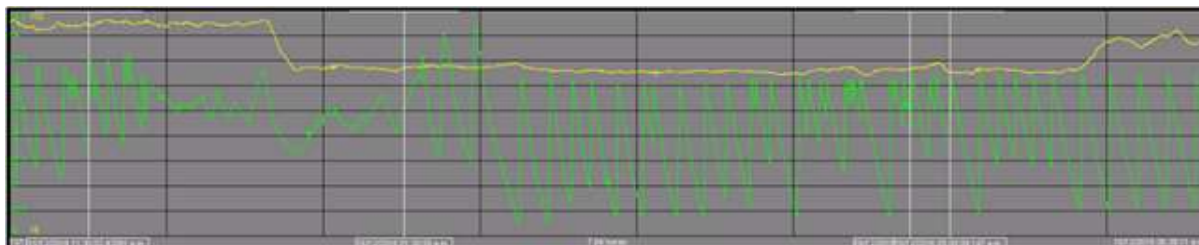


FIGURA 2 – Série Temporal do comportamento anômalo da pressão do sistema de regulação de velocidade.

## 2.2 Mineração de Dados e a Detecção de Falhas em Sistemas

A atividade de controle e supervisão em processos destinados à produção de energia elétrica, ocorre em cenários altamente especializados em que decisões complexas e de grande impacto precisam ser tomadas, muitas vezes, em curto intervalo de tempo. Assim, a capacidade de identificação automática de eventos relevantes, até mesmo os ainda não observados ou raros, pode ser muito útil para a detecção de anomalias e diagnóstico de falhas.

Anomalias referentes ao funcionamento de equipamentos de usinas geradoras de sistemas elétricos de potência são importantes eventos que ensejam perturbações, desde danos diversos aos equipamentos em si, até a interrupção no fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Muitas destas anomalias podem ser detectadas através de regras baseadas nos princípios e limites físicos de funcionamento dos equipamentos. Para isso são utilizados, por exemplo, dispositivos de proteção que monitoram algumas grandezas, emitem alarmes, ou até mesmo interrompem seu funcionamento. Deve-se ter em conta que alguns processos são bastante complexos e que estes dispositivos de proteção tradicionais não resultam em ações satisfatórias em certas condições, pois muitas vezes a anomalia se caracteriza pela relação entre diversas grandezas do cenário em análise, e não apenas por seus valores absolutos. Além disso, a grande quantidade de tipos de equipamentos, existentes nos processos envolvidos na geração de energia, também dificulta a formulação de modelos para a identificação de anomalias.

Com a digitalização dos sistemas elétricos de potência, novas oportunidades para o desenvolvimento de ferramentas de suporte às equipes de operação têm surgido. A capacidade de registrar dados digitais, coletados por diversos equipamentos, permitiu a criação de grandes bancos de dados históricos, dos quais uma grande quantidade de informações pode ser extraída a cada instante. Estes dados representam séries temporais de grandezas físicas, usualmente correspondentes a condições normais de operação.

A capacidade de registrar dados digitais, coletados por diversos equipamentos, permitiu a criação de grandes bancos de dados históricos, dos quais uma grande quantidade de informações pode ser extraída a cada instante. Estes dados representam séries temporais de grandezas físicas, usualmente correspondentes a condições normais de operação.

Para realizar o processamento deste grande volume de dados e extrair informações úteis para tomada de decisão, diversas iniciativas estão sendo executadas em Itaipu. Entre elas, foi construída uma ferramenta que usa técnicas de mineração de dados para identificar anomalias [9]. Esta ferramenta processa amostras das séries temporais de forma agregada, com o objetivo de criar um banco de dados de estrutura regular para servir de entrada para uma rede neural e outros algoritmos de mineração de dados.

A forma de agregação destes dados (período e função aplicada) representa um grande desafio para a criação de modelos precisos. Este trabalho apresenta os resultados do uso da Transformada Wavelet para agregação dos dados de modo a criar modelos robustos para detecção de anomalias em séries temporais com comportamento oscilatório, como a pressão de óleo no sistema de regulação de velocidade da UG.

## 2.3 Transformada Wavelet

A Wavelet é uma função  $\varphi(t)$  pequena e oscilatória com o objetivo de distinguir entre diferentes frequências de determinado sinal. A Figura 3 ilustra um exemplo de uma Wavelet genérica. De modo geral, elas são caracterizadas por dois principais fatores. O primeiro é de que a Wavelet deve ter uma energia finita relacionada ao sinal. Além disso, ela deve possuir uma componente de frequência zero nula. Ou seja, o valor médio de  $\varphi(t)$  deve ser igual a zero [3].

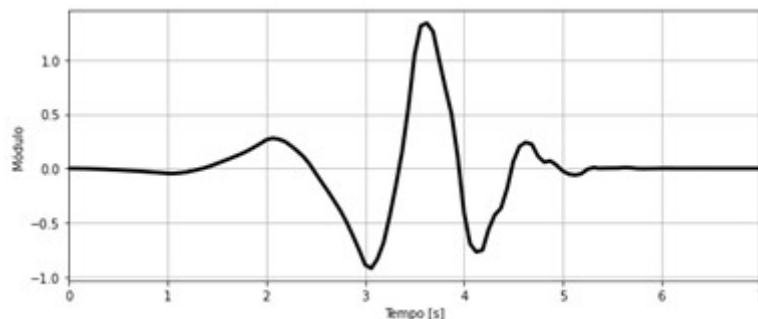


FIGURA 3 – Série Temporal do comportamento anômalo da pressão do sistema de regulação de velocidade.

Entretanto, a grande vantagem da função Wavelet é a sua capacidade de solucionar as dificuldades da resolução tempo-frequência das transformadas de Fourier. De modo geral, a análise dos sinais temporais em determinadas janelas depende diretamente do compromisso entre a resolução temporal e a resolução no domínio da frequência. Isso significa que melhores resoluções na frequência implicam diretamente em piores resoluções no tempo, conforme descrito matematicamente pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg [3].

Nesse sentido, as Transformadas Wavelet Contínuas (CWT) e Discretas (DWT) possibilitam a análise de determinado sinal temporal em diferentes frequências com diferentes resoluções, também conhecida como Análise Multiresolução (MRA) e ilustrada na Figura 4. Com isso, é possível ressaltar a relação inversamente proporcional entre a frequência e o tempo [3]. A CWT é uma função caracterizada pelos parâmetros de translação ( $\tau$ ) e de escalonamento ( $s$ ) inseridos em dada função Wavelet – também conhecida como Wavelet Mãe. Dessa forma, dado uma translação e ou escalonamento tem-se ou família de funções Wavelet a partir de uma Wavelet Mãe. Alguns tipos de Wavelet mãe estão apresentadas na Figura 4.

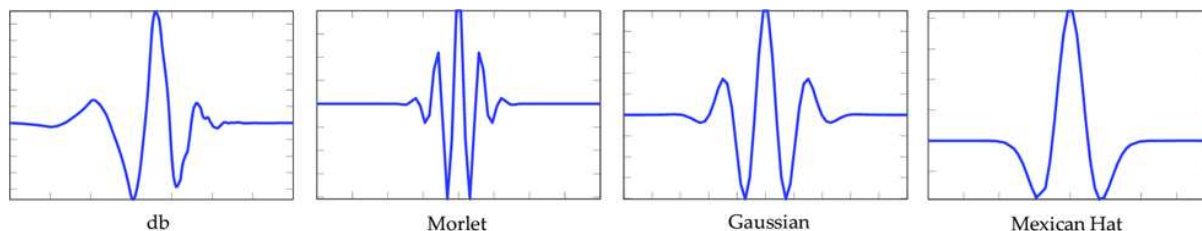


FIGURA 4 – Transformadas Wavelet Mãe.

Como exemplo do uso de transformadas Wavelet no contexto do setor elétrico, [4] propõem uma abordagem para analisar distúrbios de qualidade da energia através da transformada Wavelet. Nesse caso, utilizam-se as componentes detalhadas dos filtros para detectar e localizar distúrbios incidentes sobre a forma de onda. Em outro exemplo, [5] propõe uma técnica de classificação para categorizar os diferentes distúrbios de qualidade de energia a partir dos coeficientes resultantes da transformada Wavelet.

Ademais, [6] propõe a aplicação de uma rede neural artificial (RNA) para reconhecer e classificar os mesmos distúrbios. Outra possível aplicação da análise pela transformada Wavelet é na detecção de vazamentos internos de óleo em equipamentos. Os trabalhos de [7] e [8] descrevem as aplicações da transformada Wavelet na detecção de vazamentos internos em cilindros e pistões hidráulicos.

### 3.0 APLICAÇÃO

Assim, com base nos conceitos anteriormente apresentados, em Itaipu Binacional as equipes de operação têm elaborado ferramentas para acelerar a identificação de possíveis falhas nos diversos equipamentos dispostos na central hidrelétrica – dentre estes, o regulador de velocidade. Nesse contexto, tendo como base a identificação de falhas através de métodos do domínio da frequência, como visto em [2] e [3], a transformada wavelet aplicada sobre o sinal da série temporal da pressão hidráulica do regulador de velocidade foi observada. Essa série temporal está apresentada na Figura 5.

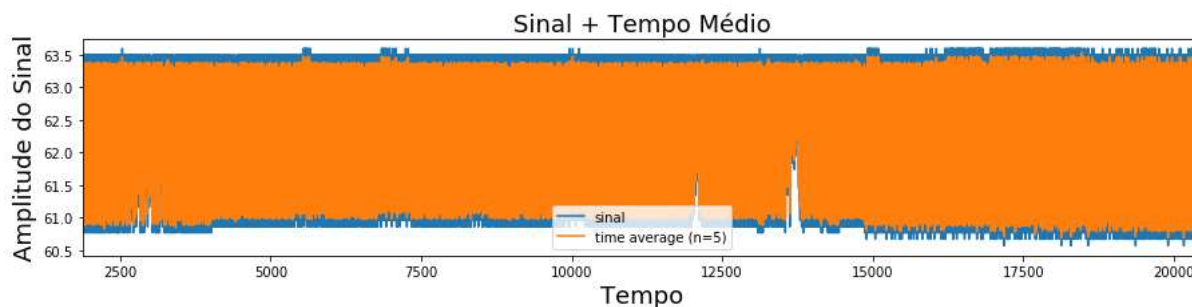


FIGURA 5 – Série temporal do valor de pressão hidráulica do regulador de velocidade das unidades geradoras de Itaipu Binacional

A partir da série temporal de pressão hidráulica obtida, constata-se falhas nos ciclos de trabalho do regulador de velocidade e que podem indicar uma falha incipiente nesse equipamento. Essas falhas podem ser notadas na Figura 5 em descontinuidades na série temporal observadas entre os tempos de 12.000 e 14.000 segundos do sinal amostrado.

As metodologias aplicadas atualmente em Itaipu Binacional para a detecção de falhas desse tipo já consideram técnicas de mineração de dados. Essas técnicas, porém, têm como entradas informações como número de ciclos de perda e recuperação de pressão, valores máximos, mínimos e médios, dentre outras. Assim, de forma a expandir o leque de opções de entradas bem como englobar possíveis falhas que estejam passando despercebidas atualmente, a transformada wavelet seguida por análise das imagens obtidas tem sido testada.

No escopo da transformada wavelet, como visto anteriormente, é realizada uma convolução da série temporal (no caso, a pressão hidráulica do regulador de velocidade das unidades geradoras) com uma transformada-série mãe. Assim, dado o grande número de famílias de transformadas-série mães disponíveis, foram testadas várias famílias visando encontrar àquela que melhor evidencia a ocorrência das falhas.

Dessa forma, as transformadas wavelet do sinal temporal de pressão hidráulica do regulador de velocidade das unidades geradoras de Itaipu Binacional com a aplicação de funções de diversas famílias pode ser visualizada na Figura 6.

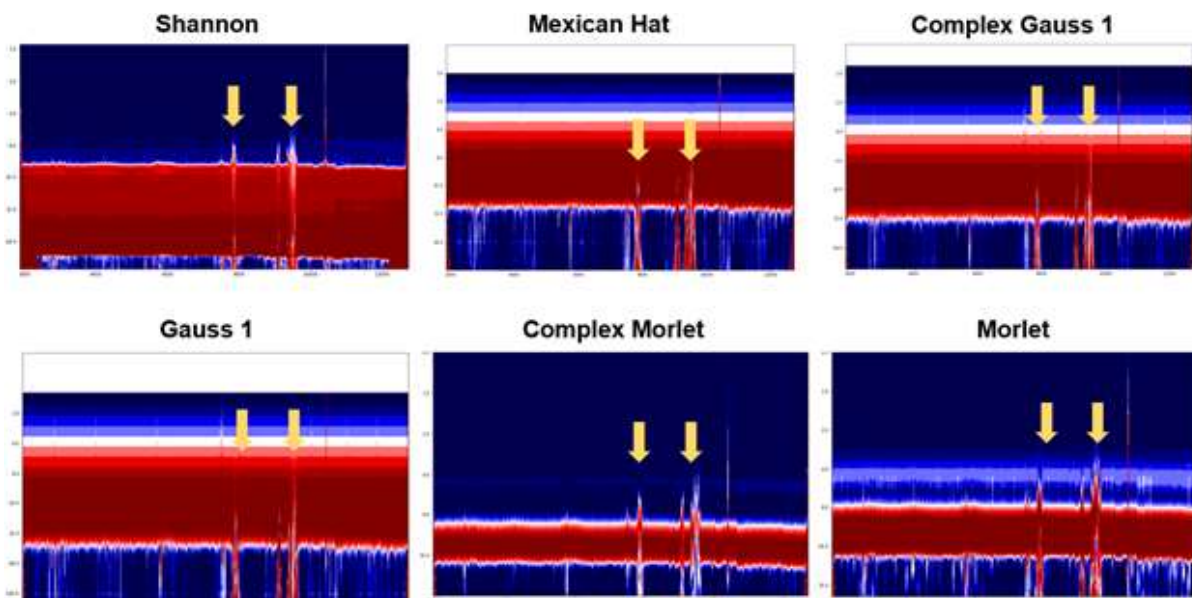


FIGURA 6 – Transformadas wavelet do sinal temporal de pressão hidráulica do regulador de velocidade para cada família de funções

Na Figura 6, vê-se que todas as transformadas wavelet construídas (independente da família escolhida), indicam a ocorrência das falhas observadas na série temporal da pressão hidráulica do regulador de velocidade. Essas falhas

estão apontadas por setas na Figura. Ainda assim, como a existência de indícios de falha será analisada por uma rede neural de detecção de imagens, as famílias que resultam nos indícios mais claros foram escolhidas.

Toda a aplicação citada anteriormente foi desenvolvida através de um script programado em linguagem Python. Esse script realiza o carregamento da série temporal da pressão hidráulica do regulador de velocidade e aplica a transformada wavelet das famílias apresentadas a esse sinal. A saída do script são as imagens apresentadas na Figura 6.

#### 4.0 RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÕES

A tomada de decisão a partir de modelos é uma abordagem bastante sedimentada na engenharia. A execução automática de modelos para a tomada de decisão em tempo real é uma consequência natural do aumento da capacidade computacional.

Dessa forma, a partir das transformadas wavelet obtidas conforme a Figura 6, estão sendo treinadas redes neurais com foco na identificação de imagens. Essas redes neurais serão aplicadas a todas as famílias de transformadas Wavelet apresentadas anteriormente. Após essa aplicação, e com o auxílio dos especialistas, serão observadas as famílias mais adequadas para a identificação das anomalias estudadas.

A acurácia da aplicação da rede neural na série agregada com a transformada wavelet é calculada pela ferramenta Weka, conforme metodologia descrita em [9]. Esta acurácia pode então ser comparada com outros métodos de agregação mais simples.

Por fim, conforme pontuado, a aplicação da transformada wavelet para agregação das séries permite solucionar as dificuldades da resolução tempo-frequência, tornando a solução mais genérica e aplicável para outros tipos de sistemas ainda sem modelagem.

#### 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ITAIPU BINACIONAL (2021). "ITAIPU BINACIONAL: A maior geradora de energia limpa e renovável do planeta". Nossa história. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/nossahistoria/>>. Acesso em: 24 de ago. de 2021.
- [2] SOUSA, Zulcy de; FUCHS, Rubens D.; SANTOS, Afonso H. M. (1983). Centrais Hidro e Termoelétricas. São Paulo: Blucher.
- [3] Merry, R. J. E., *Wavelet Theory and Applications: A literature study*. Eindhoven University of Technology, 2005.
- [4] S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady and P. Hofmann, "Power quality assessment via wavelet transform analysis," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 924-930, April 1996, doi: 10.1109/61.489353.
- [5] A. M. Gaouda, M. M. A. Salama, M. R. Sultan and A. Y. Chikhani, "Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1469-1476, Oct. 1999, doi: 10.1109/61.796242.
- [6] Zwe-Lee Gaing, "Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1560-1568, Oct. 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835281.
- [7] Y. Jin, C. Shan, Y. Wu, Y. Xia, Y. Zhang and L. Zeng, "Fault Diagnosis of Hydraulic Seal Wear and Internal Leakage Using Wavelets and Wavelet Neural Network," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 4, pp. 1026-1034, April 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2863418.
- [8] Goharrizi, A. Y. and Sepheri, N., "Application of Fast Fourier and Wavelet Transforms Towards Actuator Leakage Diagnosis: A Comparative Study". *International Journal of Fluid Power*. No. 2 pp. 39-51. 2013.
- [9] Muggiati, F. V., *et al.*, "Assistente Computacional para Supervisão De Grandezas Operativas" no. 4881, XXV SNPTTE - 2019



## DADOS BIOGRÁFICOS



Mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Especialista em Gestão Industrial pela Universidade de São Paulo (USP) e graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Atualmente trabalha em Itaipu Binacional onde já atuou como engenheiro no Departamento de Operação da Usina e atualmente trabalha na Divisão de Controle da Produção da Diretoria Técnica.

### (2) FILIPE VENTURA MUGGIATI

Mestre em Computação pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Já atuou como engenheiro no Departamento de Comercialização de Energia da Eletrobras e atualmente trabalha em Itaipu no desenvolvimento de sistemas de suporte à operação em tempo real e ferramentas de apoio às atividades de pré e pós-operação.

### (3) GUILHERME LUIZ GOMES SILVA MOTA

Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Já foi estagiário na área de Operação de Usina e Subestações na Usina Hidrelétrica de Itaipu em contato direto com os equipamentos de alta tensão envolvidos na geração de energia elétrica.