



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO -GGH

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**INSTRUMENTO ÓTICO DE MONITORAMENTO UNIDIMENSIONAL E TRIORTOGONAL
DE BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO**

Eduardo Alberto Garotti Orlowski (*)

LACTEC

Roberson Roberto Parizotto

LACTEC

Luiz Alkimin de Lacerda

LACTEC

Amauri de Jesus Garcia

LACTEC

RESUMO

As barragens de enrocamento com face de concreto são estruturas hidráulicas cujo monitoramento das percolações através do maciço são de importância fundamental no controle das suas condições de segurança. Um dos pontos que merece maior atenção são as juntas de contração. Em particular, a junta perimetral deve ter seu comportamento supervisionado através de medidores triortogonais de juntas.

São relatados os resultados do desenvolvimento de um medidor baseado em sensores de fibra ótica, cuja vantagem em relação aos do tipo elétrico é que são imunes a descargas elétricas, dispensando aparatos de proteção especial.

PALAVRAS-CHAVE

Instrumentação de Barragens, Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, Sensores de Fibra Ótica, Segurança de Barragens,

1.0 - INTRODUÇÃO

O presente artigo apresenta os resultados do projeto de P&D da Aneel, Ciclo (2009/2010), "Instrumentos de monitoramento com fibras óticas para aplicação em barragens de enrocamento"; pesquisa esta realizada pelo LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento para a Construtora Queiroz Galvão S/A. Um dos sistemas de instrumentação pesquisados foi o do medidor triortogonal de juntas baseado em sensores de fibra ótica. Os mesmos se notabilizam, a priori, por serem sistemas imunes às descargas elétricas, resultando em dispositivos de maior vida útil, de maior precisão e de maior sensibilidade aos fenômenos medidos. Algumas destas vantagens são estudadas bem como os pontos considerados críticos para este tipo de sensores.

O propósito dos estudos foi o de desenvolver um equipamento medidor de juntas que aliasse as características de imunidade a descargas elétricas que os sensores de fibra ótica possuem, com a robustez de um corpo protetor metálico capaz de resistir à penetração de água; de forma a possibilitar que o dispositivo fosse instalado na junta perimetral das barragens de enrocamento com face de concreto, condição esta que é a real de operação destes equipamentos.

A pesquisa deu-se em duas etapas. A primeira foi o desenvolvimento e a instalação de duas unidades unidimensionais em duas juntas entre os blocos no muro da crista da barragem do estudo de caso. Procurou-se investigar o desempenho do sistema no arranjo em série, a consistência e a coerência das leituras de abertura e fechamento de juntas obtidas de acordo com as influências do meio externo, principalmente a temperatura ambiente, além dos parâmetros de resistência mecânica dos conjuntos. Para tal, foram realizadas campanhas de campo para a aquisição das leituras através de um leitor portátil. A segunda etapa consistiu do desenvolvimento, fabricação e montagem de uma versão triortogonal do medidor. Este protótipo foi elaborado para a medição dos três movimentos relativos entre as lajes da face e o plinto (movimentos de abertura e fechamento, recalque e cisalhamento das juntas).

(*) LACTEC - Centro Politécnico da UFPR, s/n° – CEP 81.531-990 Curitiba, PR, – Brasil
Tel: (+55 41) 3361-6327 – Fax: (+55 41) 3361-6141 – Email: eagorlow@lactec.org.br

Os esforços da equipe de projeto se concentraram em procurar a estrutura mecânica do transdutor, que é a parte responsável pela conexão do sensor com o entorno, que fosse a mais adequada, tanto em termos de proporcionar a liberdade de movimentação relativa entre os componentes do equipamento, como proteger o sensor dos elementos agressivos do meio externo. Atingiu-se dessa maneira um índice de proteção IP-67, de acordo com a norma brasileira NBR 6146, considerado insuficiente para que se pudesse afirmar que o aparelho atende às necessidades da operação em campo. O fator IP68 é a meta que deverá ser atacada na continuidade das pesquisas, bem como o do desenvolvimento de um conjunto de dispositivos de adaptação (kit), o qual permitirá que o medidor possa ser instalado numa gama maior de configurações geométricas.

Após dois anos de duração, o projeto apresentou como resultado final da pesquisa o protótipo tridimensional que consta da Figura 1.



FIGURA 1 – Protótipo do medidor triortogonal de juntas, montado (fev/2011).

2.0 - BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM FACE DE CONCRETO

O início da década de 1970 pode ser considerado como o marco para o desenvolvimento das BEFCs (Barragens de Enrocamento com Face de Concreto). Com esta tecnologia, tornou-se possível a construção de barragens com alturas acima de 150 m (médio e grande portes), Cruz [1]. Em comparação com a barragem de enrocamento com núcleo de terra, ela é muito mais segura, considerando-se em específico contra tremores de sismos intensos, Cooke [2]. Ainda neste aspecto, as BEFCs são estruturas seguras a longo prazo, no que se refere à estabilidade estática e dinâmica. Este fato pode ser comprovado no caso dos abalos sofridos em maio de 2008 (8,0 graus na Escala Richter) pela barragem de Zinpingpu, com 156 m, concluída em 2006, que se manteve segura e com estabilidade, muito embora tenham ocorrido danos na laje e na crista, Cruz [1].

O aspecto da segurança das barragens de enrocamento envolve, entre outros itens, o monitoramento das infiltrações pela mesma. Neste sentido, é muito importante o controle do desempenho e da integridade da laje da face de concreto, sendo que para isso é necessário dispor de um sistema de instrumentação eficiente, preciso e confiável.

Como motivação para a presente pesquisa, convém citar a barragem de enrocamento de Campos Novos, que em anos recentes apresentou problemas de infiltração, com fissuração da laje da face de concreto, (2).

A barragem de Campos Novos, ao ter o reservatório com enchimento a 97 % da altura total, em junho de 2006, sofreu danos (fissuras) na laje devido ao esvaziamento rápido ocorrido em consequência de um acidente no Túnel de Desvio nº 2. Tais fissuras foram ocasionadas pelo excesso de compressão no concreto nas lajes, num fenômeno conhecido como spalling, Antunes et. alli. (2). As barragens de Mohale e TSQ-1, respectivamente na África do Sul e China, também apresentaram o mesmo tipo de dano em suas lajes, Cruz [1].

As barragens de enrocamento com face de concreto são constituídas por um maciço de agregados e solos compactados em camadas sucessivas. A proteção das mesmas, frente ao reservatório é feita através de lajes verticais de concreto na face de montante, as quais possuem juntas entre si a intervalos regulares. Uma junta perimetral se encarrega de fazer a interface do plinto, que é uma estrutura de fundação de concreto construída ao longo das ombreiras e do leito do rio, com o enrocamento propriamente dito. É de fundamental importância controlar as movimentações relativas entre as zonas de tração e compressão das lajes da face de concreto, bem como o comportamento da junta perimetral em pontos de determinada profundidade, no sentido de se monitorar e prevenir problemas de percolação de água pelo corpo da barragem.

O objetivo do desenvolvimento do medidor triortogonal é o de se chegar a um dispositivo que permita monitorar as movimentações da junta perimetral. Em razão disto, o foco da pesquisa é se obter um aparelho dotado de sensores capazes de resistir às profundidades encontradas nos diversos pontos da junta.

3.0 - ESTUDO DE CASO – BARRAGEM DE UHE QUEBRA-QUEIXO.

A barragem da UHE Quebra-Queixo, de propriedade da Companhia Energética Chapecó, em Queiroz Galvão Energia S.A. localiza-se no rio Chapecó, pertencente à Bacia do rio Uruguai. Situa-se no estado de Santa Catarina no rio Chapecó (Bacia do rio Uruguai). Os municípios limítrofes são Ipuauçu (margem esquerda) e São Domingos (margem direita). As coordenadas geográficas são: Latitude (26°40'S) e Longitude (52°33'W). O principal acesso à usina se faz pela rodovia SC-480 (município de Ipuauçu, a partir da BR-282). A distância aproximada à capital do estado, Florianópolis, é cerca de 540 km, e a de Curitiba é de cerca de 440 km.

O empreendimento foi implantado num prazo de 30 meses, sendo que as unidades de geração entraram em operação na seguinte seqüência: a 1ª unidade em 23/12/2003, 2ª em 27/12/2003 e 3ª unidade em 31/12/2003. A usina conecta-se ao sistema através da subestação de Pinhalzinho, de propriedade da CELESC/SC, a 54 Km de distância da usina por 2 circuitos (LT1 e LT2) em 138 kV. Possui uma potência instalada de 121,5 MW, com energia assegurada de 59,7 MW Médio.

O reservatório, com El. Normal na cota 549,00, possui uma área de 5,6 Km². O desvio do rio foi realizado através de um túnel escavado em rocha, com 345 m de comprimento. O vertedouro, tipo soleira livre, tem uma capacidade de descarga de 5.000 m³/s.

A casa de força é do tipo abrigada, com 3 turbinas tipo Francis de Eixo Vertical, cada unidade com 40,5 MW, (3).



FIGURA 1. Aspectos da crista da barragem da UHE Quebra-Queixo.

A Tabela 1, a seguir, apresenta as principais características da barragem da UHE Quebra-Queixo.

TABELA 1. Características da barragem da UHE Quebra-Queixo

Tipo	Enrocamento com face de concreto
Elevação da crista	553,00 m
Largura da crista	7,00 m
Comprimento	670,00 m
Altura máxima	70,00 m
Escavação comum	805.654 m³
Barragem principal:	
Solo compactado	10.234 m³
Filtros e transições	73.722 m³
Enroc. Random e Rip-Rap	3.1.346 m³

4.0 - DESENVOLVIMENTO DE MEDIDORES UNIDIMENSIONAIS E TRIORTOGONAIIS DE JUNTAS

4.1 Histórico do projeto

O projeto foi desenvolvido em duas etapas. A primeira concentrou-se na elaboração dos medidores unidimensionais. Nesta fase, foi selecionado o local de instalação dos medidores em juntas contíguas próximas à ombreira direita da barragem, mais precisamente nas juntas 7/8 e 8/9.

Tais pontos foram escolhidos, tendo-se em vista a análise de dados da instrumentação existente, a qual é constituída por medidores elétricos de juntas. Em específico, o medidor de juntas elétrico instalado na junta 7/8 (medidor de junta 2) apresentou uma tendência de abertura no seu comportamento. O medidor de junta 3 (instalado na junta 8/9) teve sua vida útil abreviada, o que é comum ocorrer neste tipo de instrumento, que está mais suscetível a falhas por penetração de umidade nas emendas e a descargas atmosféricas.

Nessas condições, os medidores de junta foram instalados em ligação em série, sendo que o de número 2 (junta 8/9) recebeu o sensor de temperatura, para mensuração do efeito térmico do ambiente na crista da barragem. As

instalações foram realizadas na crista no lado de montante, sem no entanto serem fixados abaixo do nível do reservatório. A intenção da equipe de pesquisa era tão somente avaliar a capacidade do sistema de sensores de fibra ótica em apresentar uma resposta coerente com o comportamento esperado da movimentação de abertura e fechamento das juntas.

Paralelamente, foram realizados estudos em laboratório para se produzir uma solução que conferisse resistência à penetração de água no corpo do sensor. Inicialmente, foram feitos testes utilizando-se um protótipo dotado de dois o-rings apenas. Nesse primeiro teste, em que foi atendido o preconizado pela norma NBR 6146 [ref x], houve a penetração de 70 ml de água. Porém, ao se tentar uma alternativa com uma nova peça dotada de três o-rings, o teste de fator de proteção não apresentou resultado satisfatório: houve entrada de água no interior da cápsula de proteção do sensor, num volume de cerca de 40 ml, aproximadamente. O ideal é que não houvesse penetração de água em hipótese nenhuma. Se tal feito fosse concretizado, poder-se-ia conferir ao aparelho o fator de proteção IP68.

Os estudos então se detiveram nas questões relativas aos medidores unidimensionais e o seu comportamento em campo e no laboratório. As investigações acerca do medidor triortogonal restringiram-se à montagem de um protótipo não-funcional, sendo que não foi possível durante a execução do projeto realizar testes de bancada em que fossem simulados os três movimentos de uma junta: abertura/fechamento, cisalhamento vertical e cisalhamento horizontal. Tais questões serão objeto de projetos posteriores.

4.2 Ensaio do fator de proteção do medidor triortogonal

O projeto mecânico do medidor triortogonal é basicamente formado por três medidores unidimensionais dispostos ortogonalmente, compreendendo, assim, os três eixos cartesianos x, y e z.

O sistema é composto de chapas de posicionamento para fixação do conjunto triortogonal na barragem. Nas referidas chapas, posicionam-se os medidores unidimensionais formando assim o conjunto triortogonal. Cada medidor unidimensional é composto de uma base de movimentação para ajuste de altura, dois cilindros de vedação que realizam movimento relativo entre si, um sensor de fibra ótica alocado no interior dos cilindros e uma segunda base de movimentação também utilizada para ajuste de altura e angulação na outra extremidade do dispositivo unidimensional. Todo o dispositivo triortogonal foi projetado e fabricado em alumínio, evitando-se assim o problema de oxidação e travamento do mecanismo. Foram considerados todos os esforços e carregamentos sofridos em campo para que o não ocorressem problemas de deformação por esforços excessivos.

A idéia inicial de desenvolver cilindros para alocar os sensores de fibra ótica partiu do princípio de se desenvolver um equipamento que garantisse a vedação para que o sensor não tivesse contato com a água. Após a realização do projeto foi necessária a realização de ensaios para determinação do grau de proteção contra partículas sólidas e partículas líquidas.

4.2.1 Procedimento de ensaio do fator de proteção

O ensaio do fator de proteção a ser realizado no dispositivo não era padrão; porém, assim mesmo, partiu-se das diretrizes e parâmetros básicos preconizados na norma NBR 6146 para a determinação de grau de permeabilidade. Sendo assim, o objetivo principal do ensaio foi o de verificar o grau máximo correspondente ao índice de impermeabilidade (IP). Os equipamentos e materiais utilizados no ensaio foram: medidor unidimensional, bancada de ensaio com movimentação em apenas uma direção, paquímetro, escala, suporte para fixação na bancada, vedador semi-secativo, reservatório de água de 1.000 litros, talco para realização de ensaio de partículas sólidas.

A metodologia utilizada foi baseada integralmente na norma para determinação de grau de permeabilidade e nos procedimentos implícitos necessários à realização deste ensaio, tanto no ensaio de partículas sólidas como no ensaio de submersão em um reservatório cheio de água. O ensaio subaquático consiste, de um modo geral segundo a norma, em ensaio estático. No entanto, como há a necessidade de movimentação do equipamento submerso quando o mesmo for a campo, foi realizado um ensaio dinâmico no equipamento.

O ensaio estático revelou que o equipamento ao ser imerso em água manteve uma boa vedação, considerando que houve penetração de algumas gotículas de água no interior do invólucro, porém tal quantidade de água não é suficiente para interferir com o bom funcionamento do equipamento. Já no ensaio dinâmico o equipamento, não apresentou bom desempenho no teste para validação como grau máximo de proteção, pois o mesmo não atende as determinações de movimentação enquanto submerso, pois segundo a norma o equipamento não é adequado para submersão contínua em água nas condições especificadas pelo fabricante. Após o ensaio, foi constatado um volume de 70 mililitros de água no interior do invólucro de proteção do sensor.

Durante o ensaio de partículas sólidas, o equipamento foi submetido a aplicação direta de pó de talco e também envolto em uma nuvem de talco. Foi observado que o equipamento não sofreu penetração de partículas de pó de talco, sendo assim que se considera a vedação contra partículas sólidas como sendo satisfatória, tanto na condição estática como na condição dinâmica.

De acordo com os ensaios realizados no equipamento, conclui-se que, para critério de qualificação, o equipamento avaliado não obteve o grau máximo de proteção que no caso em questão seria IP68. No que diz respeito a partículas sólidas o equipamento obteve o grau máximo, classificando assim o primeiro numeral como IP6x. Em relação ao ensaio de submersão, o dispositivo obteve o segundo numeral de classificação 7; resultando numa classificação, no que diz respeito a penetração de líquido, como IPx7. Considerando as avaliações do invólucro após os ensaios, o equipamento deverá ser classificado como IP67, portanto, insuficiente para a condição a que estará sujeito.

4.3 Sensores de deslocamento e de temperatura

Os sensores de deslocamento utilizados foram os de modelo FS-6100 (Linear Position and Displacement Sensor). Já o medidor de temperatura foi o modelo FS-6300 (Weldable Temperature Sensor), que foi colado com adesivo epóxi à base do medidor de junta MJ-02. Ambos os produtos são de fabricação da Lupatech. As características técnicas dos sensores estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3 a seguir:

TABELA 2. Sensor linear de posição e de deslocamento

Especificação	
Sensibilidade	76 pm/mm
Faixa de medição	25 mm
Comprimento de onda central	1530 a 1570 nm
Operação	
Temperatura	-20 °C a 80 °C
Umidade relativa	< 90% a 80 °C

TABELA 3. Sensor de temperatura

Especificação	
Sensibilidade	10 pm/°C
Faixa de medição	0,5 °C
Acurácia	0,1 °C
Comprimento de onda central	1510 a 1590 nm
Operação	
Temperatura	-20 °C a 80 °C
Umidade relativa	< 90% a 80 °C

4.4 Análise das leituras obtidas pelo sistema de medição

O sistema instalado consta de dois medidores de junta baseados em sensores de fibra ótica está acompanhado de um sensor de temperatura também em fibra ótica, instalado no medidor de juntas MJ-02, apresentou a seguinte série de leituras no dia 23/02/2011, conforme mostram as Figura 2 a 4, a seguir.

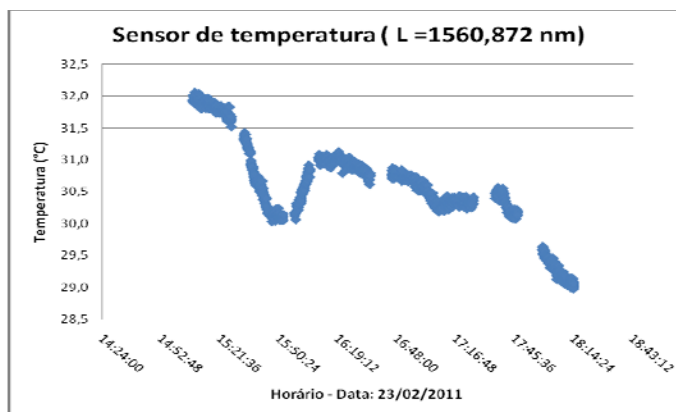


FIGURA 2 – Gráfico do sensor de temperatura

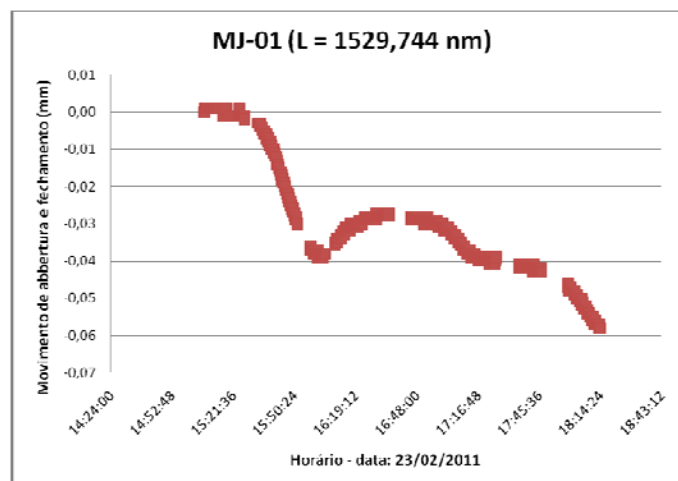


FIGURA 3 – Gráfico do medidor de juntas MJ-01.

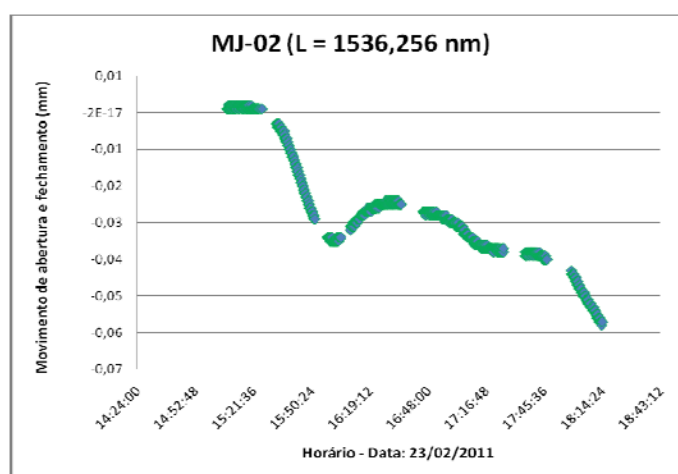


FIGURA 4 – Gráfico do medidor de juntas MJ-02.

Os movimentos de abertura são denotados pelos valores negativos e os movimentos de fechamento são denotados pelos valores positivos. O que se pode observar é que para o período em que foram realizadas as medições das 15:30 h até as 18:00 h, as duas juntas mantiveram um comportamento coerente com o esperado. Houve um decréscimo de temperatura, no intervalo considerado, de cerca de 3,0 °C, o que foi acompanhado pela abertura das juntas, devido ao retraimento do concreto frente à queda de temperatura devido ao anoitecer que estava se aproximando.

5.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais dificuldades de implementação durante os estudos e atividades da pesquisa estão relacionadas com as questões de proteção do sensor de deslocamento quanto à penetração de água no invólucro de proteção. De fato, não se conseguiu atingir o grau de proteção necessário para este tipo de medidor. Com o término do projeto, permanecem as dúvidas se o sistema ótico pode resistir à ação da umidade por um tempo mais prolongado, pois esta questão não pode ser avaliada. De uma maneira geral, em termos do desempenho dos medidores baseados em sensores de fibra ótica, o sistema demonstrou sensibilidade, coerência e precisão das leituras.

Em resumo, o projeto conseguiu cumprir a etapa unidimensional de desenvolvimento do medidor, conseguindo um resultado parcial com fator de proteção IP-67. Para uma sequência do projeto, os esforços devem se concentrar na busca pelo fator de proteção IP-68 e na avaliação da durabilidade dos sensores quanto a efeito da penetração da umidade. Também se cogita a produção de um sensor de deslocamento com uma faixa de medição maior, em torno dos 50 mm. A questão dos conjuntos de adaptadores de instalação para as diversas condições geométricas da junta perimetral é um outro objetivo a ser perseguido na continuidade do projeto.

Agradecimentos. Os autores gostariam de agradecer aos profissionais das empresas Construtora Queiroz Galvão S/A pela cessão dos dados do referido projeto de pesquisa e desenvolvimento, bem como pelo apoio de campo da equipe da UHE Quebra-Queixo e ao LACTEC, pela oportunidade da participação no evento.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) CRUZ, P. T.; MATERÓN, B.; FREITAS, M. Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, 2009.
- (2) ANTUNES SOBRINHO, J.; XAVIER, L. V.; ALBERTONI, S. C.; PEREIRA, R. F. Usina Hidroelétrica Campos Novos – Barragem de Enrocamento com face de Concreto - Relato do Desempenho, Ocorrências e Recuperações na Face de Barragem. XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2007.
- (3) Site da Companhia Energética Chapecó - <http://www.uhequebraqueixo.com.br> (Acesso em fev/2011).
- (4) LACTEC, RT.LAME. Relatório Final P&D Aneel “Instrumentos de monitoramento com fibras óticas para aplicação em barragens de enrocamento”; 2011.
- (5) Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 6164, 1980

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Eduardo Alberto Garotti Orlowski

Engenheiro Civil, UFPR, 1988
Especialista em Engenharia Hidráulica, UFPR, 1995
Especialista em Sensores, UFPR, 2007

Engenheiro Civil Pleno, COPEL, Companhia Paranaense de Energia, (1994 - 2000)
Pesquisador Junior II, LACTEC, Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, (2000 -)