

Sistema Autônomo para Medida de Flecha, Corrente e Temperatura de Linhas de Transmissão.

Gilson A. Fernandes, Manuel M. dos Santos, Rodrigo N. Lacerda, Francisco Smolka, Fábio Nazaré, Marcelo M. Werneck, Carlos Alberto de Carvalho, Rafael Martins Ribeiro e Lianete Margot Klauck

Resumo—O artigo apresenta um sistema para medição, em tempo real, da flecha do condutor fase de uma linha de transmissão (LT), o qual foi desenvolvido no decorrer dos anos de 2008 a 2010. O objetivo do projeto foi desenvolver um sistema para captura e processamento de imagens, alimentado por painéis solares, assim como sensoriamento de temperatura e corrente com isolamento obtido por fibra óptica, bem como toda a estrutura mecânica para fixá-lo na torre. Este sistema tem como objetivo prover, às concessionárias de energia, informações em tempo real relativas à flecha do condutor de energia de linhas de transmissão, cuja amplitude está associada diretamente à temperatura do condutor, temperatura ambiente e a intensidade de corrente conduzida. Tais informações possibilitarão a otimização da rede de transmissão de elétrica em função do consumo de energia local, bem como indicadores para o redimensionamento das mesmas.

Palavras-chave – Fibra Óptica, Flecha, Processamento Digital de Imagens, Visão Computacional.

I. INTRODUÇÃO

Acompanhando o crescimento econômico do país, a demanda de energia vem aumentando progressivamente, ocasionando um acréscimo substancial no carregamento dos componentes do sistema de transmissão de energia elétrica, das unidades geradoras para os centros consumidores. Este

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Este trabalho foi apoiado parcialmente pela Rio Grande Energia (RGE) e Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL).

Gilson A. Fernandes é desenvolvedor de sistemas pleno da FITec (e-mail: gafernandes@fitec.org.br).

Manuel M. dos Santos é consultor técnico e desenvolvedor de sistemas da FITec (e-mail: mmsantos@fitec.org.br).

Rodrigo N. Lacerda atua como gerente de projeto sênior da FITec para projetos de pesquisa e desenvolvimento (e-mail: rnlacerda@fitec.org.br).

Francisco Smolka é Diretor de Tecnologia da OptoLink (e-mail: smolka@optolink.com.br).

Fábio Nazaré é aluno de Dc.S. da COPPE/UFRJ (e-mail: fabio@lif.coppe.ufrj.br).

Marcelo M. Werneck é professor da COPPE e coordenador do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (e-mail: werneck@lif.coppe.ufrj.br).

Carlos Alberto de Carvalho é engenheiro de soluções de manutenção sênior da CPFL (e-mail: cacarvalho@cpfl.com.br)

Rafael Martins Ribeiro é engenheiro pleno de linhas de transmissão da RGE (e-mail: rribeiro@rge-rs.com.br)

Lianete Margot Klauck é especialista, engenheiro de pesquisa e desenvolvimento da RGE (e-mail: lklauck@rge-rs.com.br)

problema vem se agravando pelo descompasso entre a demanda e a construção de novas linhas de transmissão. Uma forma de minimizar este problema consiste em avaliar a capacidade ociosa potencialmente existente nos condutores de energia elétrica, uma vez que o dimensionamento de sua capacidade tem por base considerar fatores de segurança nos parâmetros que compõem o modelo matemático empregado, dada a complexidade resultante do modelo quando considera-se todas as variáveis associadas ao modelamento.

A capacidade de transmissão de uma LT (linha de transmissão) é definida pelo pico máximo de corrente elétrica que é capaz de suportar sem que sejam excedidos os limites de segurança e ou integridade de seus materiais construtivos. O aumento da corrente provoca maior aquecimento dos condutores e, conseqüentemente, sua dilatação produzindo acréscimo na flecha, levando à possível violação de espaçamentos de segurança e isolamento, face à rigidez dielétrica do ar em torno do condutor.

“O enfoque estatístico da ampacidade acena com a possibilidade de um aumento dos atuais níveis de carregamento das LT's, sem decréscimo de sua confiabilidade operacional. Esse aumento é possível pelo fato dessa nova metodologia medir e considerar as reais condições climáticas da região atravessada pela LT e, conseqüentemente, uma avaliação mais precisa da troca de calor do condutor com o ambiente” [1]. Para isto é necessário entender, na prática, como a flecha é afetada pelas variáveis, temperatura ambiente, temperatura e corrente do condutor. Este entendimento fornecerá subsídios para a composição de um modelo que possibilite o cálculo da ampacidade efetiva do condutor. Para validar o modelo matemático, faz-se necessário uma medição direta da flecha.

Existem dispositivos comerciais e ou soluções para medir a flecha dos condutores de energia, como o Power Donut [2] instalado no condutor fase da LT. O equipamento fornece medições de corrente, tensão, potência ativa e reativa, temperatura e ângulo de inclinação do condutor, o que permite calcular a flecha. O CAT-1, desenvolvido pela Valley Group Inc. [3] é comercializado desde 1991. O equipamento é instalado em série com a cadeia de isoladores no seu ponto de fixação na torre, sendo utilizado para monitoramento, em tempo real, da flecha, tendo por base as medições de temperatura e tração mecânica do condutor. O SagometerTM [4], desenvolvido pela EDM International Inc., faz uso de uma câmera de vídeo instalada na torre e de um alvo proprietário instalado no condutor fase de energia. O sistema utiliza a câmera para detectar o movimento do alvo e assim calcular a flecha. Neste sistema podem ser instalados outros dispositivos, como sensores para medir corrente e temperatura e

também uma estação meteorológica. Existem dois estudos sobre a medição da flecha utilizando sistema de posicionamento global – GPS [5], [6] - ambas propostas instalam módulos GPS no condutor fase e monitoram, remotamente, a variação de altitude dos dispositivos. Outra solução utiliza dois sensores baseados em power line communication – PLC [7] -, cada um em uma extremidade do condutor. O sistema mede o atraso na transmissão de dados entre estes sensores, estimando o aumento no comprimento do condutor devido à dilatação.

No presente trabalho, foi desenvolvida uma solução baseada na captura e processamento de imagem de uma esfera de sinalização, que é um objeto conhecido e comumente utilizado pelas concessionárias de energia, instalada no condutor fase, para medição direta da flecha. Diferente de outras soluções que necessitam de dispositivos proprietários instalados nos condutores. O Sistema também incorpora sensores de temperatura do condutor, temperatura ambiente e corrente do condutor através de dispositivos ópticos, que é também um diferencial, uma vez que os sensores localizados na região de alta tensão ficam totalmente isolados dos demais dispositivos. Estes dados poderão ser utilizados no modelamento matemático da ampacidade e da flecha do condutor, podendo ser confrontado com os dados advindos da medição direta da flecha. As informações obtidas por meio desta solução possibilitam dimensionar a ampacidade efetiva do condutor e sua eventual ampliação, face a uma possível capacidade ociosa do sistema.

O projeto PD58 – “Desenvolvimento de Sistema Visando a Otimização da Capacidade de Transmissão de LTs”, foi dividido em cinco sub produtos, a saber: captura e processamento de imagens, medição de temperatura e corrente via sensores remotos isolados por fibra óptica, alimentação por painéis solares, softwares de gerência/coleta de dados e estrutura mecânica para abrigar e fixar os equipamentos na torre da linha de transmissão.

O projeto encontra-se concluído e foi executado em colaboração técnica entre a Fundação para Inovações Tecnológicas (FITec), o Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) da COPPE, UFRJ, OptoLink Indústria e Comércio Ltda e sendo financiado com recursos de P&D ANEEL das concessionária Rio Grande de Energia S/A (RGE) e Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL). A FITec ficou com a responsabilidade de desenvolver o sistema de captura e processamento de imagens, sistema de alimentação, sistema de controle, acesso e manipulação dos dados e também a estrutura mecânica. O LIF ficou com a tarefa de desenvolver o sistema de medição de temperatura e corrente do condutor de energia e temperatura ambiente próxima ao condutor. A OptoLink assumiu as atividades de engenharia de produto e processo produtivo dos equipamentos. A RGE e CPFL, além de financiadoras do projeto, deram todo o suporte para o desenvolvimento, implantação e testes do sistema.

Como parte final do projeto, o sistema foi instalado e testado na Cidade de Caxias do Sul, RS, na subestação de energia Caxias 1. Foram coletados dados de deslocamento da flecha, medidas de temperatura e corrente do condutor de energia e temperatura ambiente, a cada 30 minutos. O sistema gerou um arquivo de log com as informações coletadas

por uma rede Wi-Fi.

Para a RGE, CPFL e demais concessionárias de energia, o sistema oferece dados para análise dos limites operacionais das linhas de transmissão. Estas informações, posteriormente, serão utilizadas como parâmetros para a validação de um modelo matemático para o cálculo da ampacidade e da flecha dos condutores.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O sistema desenvolvido nesta pesquisa pode ser dividido em seis módulos, sendo: sensores de corrente e temperatura, sistema de captura e processamento de imagens, sistema de alimentação solar, concentrador de dados, aplicativos coletor e servidor de dados e estrutura mecânica. Uma visão em blocos do sistema pode ser vista na Figura 1.

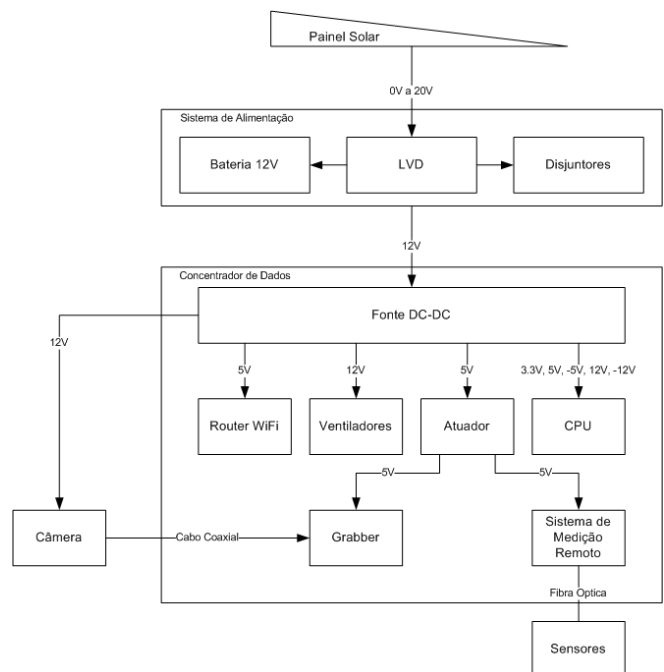


Figura 1 – Diagrama em blocos projeto PD58

A seguir, apresenta-se a descrição e funcionamento de cada um dos módulos, evidenciando sua operação e as tecnologias utilizadas no desenvolvimento.

A. Sensor de Corrente e Temperatura

O sistema de monitoramento de corrente e temperatura é composto por um transformador de corrente de base optoeletrônica (TCO) e a seção de medição de temperatura. As medições são realizadas no ambiente de alta tensão, contudo, os dados precisam ser recuperados e processados em uma base central na região de baixa tensão, e esta é uma configuração bastante empregada em sistemas de medição em ambientes de alta tensão [8].

O sistema em alta tensão responsável pelas medidas de corrente elétrica e temperaturas do cabo e ambiente é opticamente alimentado pelo sistema situado na região de baixa tensão da seguinte maneira: na região de potencial terra um laser de potência óptica de 1W injeta um feixe de luz com comprimento de onda de 830 nm em um cabo de fibra óptica multimodo. Este cabo é direcionado para a região de alta tensão através de um isolador polimérico projetado para proteger os dispositivos situados na região de baixa tensão.

Já na região de alta tensão, a luz do laser é convertida para energia elétrica por meio de um fotodetector de silício. A energia obtida desta forma alimenta todos os circuitos situados próximos ao condutor, são eles: sensores de corrente e temperatura, microcontrolador e transmissor serial de fibra óptica. Os dados das medições são enviados para a base central por outra fibra do mesmo cabo óptico multimodo, também isolado pelo isolador polimérico previamente citado.

Uma bobina de Rogowski, a qual consiste numa bobina helicoidal envolvida em um núcleo não-magnético, é empregada como sensor de corrente, oferecendo vantagens em relação a transformadores de corrente convencionais, tais como linearidade e fácil manuseio [9]. As medições tanto da temperatura do cabo quanto da temperatura ambiente são realizadas por meio de sensores de temperatura integrados, devidamente protegidos das intempéries. Estes sensores, além de não serem caros, são práticos e de simples utilização. As saídas elétricas dos sensores são digitalizadas e processadas utilizando um microcontrolador de baixo consumo, e posteriormente enviados para o sistema receptor na região de baixa tensão através de um LED operando em 850 nm e conectado a uma fibra óptica multimodo.

Alimentação e comunicações poderiam ter sido combinadas em um único canal, ou seja, uma única fibra óptica ligando as regiões de alta e baixa tensão, entretanto, por questões de simplicidade e barateamento da eletrônica envolvida, foi feita a opção por duas fibras ópticas dedicadas de um mesmo cabo. Um diagrama de blocos simplificado e que apresenta uma visão geral do sistema de medição de corrente e temperatura é apresentado na Figura 2.

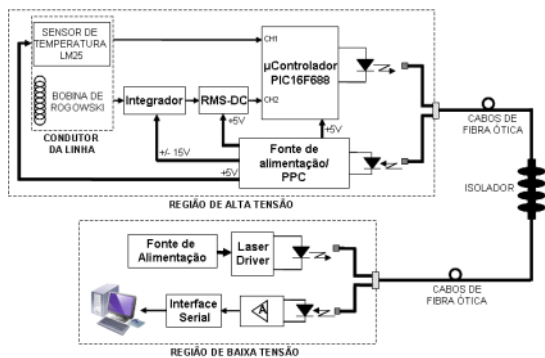


Figura 2. Visão geral do sistema de medição de corrente e temperatura.

O sensor de corrente implementado no projeto é uma bobina de Rogowski de utilização comercial que pode, todavia, também ser fabricada para aplicações específicas. A possibilidade de poder envolver a bobina em torno do condutor a ser monitorado, devido à utilização de terminais de enroscamento, concede ao dispositivo facilidade de manuseio e praticidade em situações de instalação em locais de acesso dificultado.

O campo magnético gerado pela corrente elétrica no condutor induz uma tensão de saída na bobina dada por

$$V_{\text{ROGOWSKI}} = -M \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Onde M é a indutância mútua entre a bobina e o cabo e i é a corrente a ser medida. Essa tensão de saída é eletronicamente integrada, fornecendo um sinal de saída que é proporcio-

nal à corrente. As bobinas utilizadas são protegidas contra campos eletromagnéticos e possuem terminais de enroscamento, de forma que se tenha um fechamento do enlace ao redor do condutor mais robusto.

O circuito integrador, para recuperação da forma de onda de corrente a partir da tensão induzida na bobina e amplificação do sinal, provê duas sensibilidades de medição: 100 A/V e 500 A/V. Entretanto, de forma a possibilitar a medição de correntes acima de 500 A de amplitude sem saturar os circuitos de tratamento do sinal de saída do circuito integrador, os quais em geral são alimentados com níveis de tensão de 5 V, foi utilizada no projeto a sensibilidade 500 A/V; ou seja, é permitida uma faixa de medida mais ampla.

As bobinas de Rogowski oferecem algumas vantagens em comparação com outros transdutores de corrente. Como não possuem núcleo ferromagnético, como os transformadores de corrente convencionais, os sensores Rogowski não sofrem os efeitos de saturação magnética e a indutância mútua é independente da corrente sendo medida. Ou seja, as bobinas são dispositivos lineares. A utilização do sensor também se dá de maneira bastante prática, uma vez que o dispositivo é em geral leve, pequeno e flexível, podendo ser empregado no monitoramento em ambientes de difícil acesso ou de espaço restrito.

Uma vez que os sistemas de medição são alocados em campo aberto, todos os circuitos, incluindo a bobina de Rogowski, devem ser protegidos contra os problemas que podem surgir a partir de diferentes condições ambientais, tais como deterioração da sensibilidade do sistema e da estabilidade. Dessa forma, os circuitos são alocados em um invólucro classe IP66, provendo proteção contra umidade e poeira.

As medições de temperatura são implementadas por sensores de temperatura de precisão, alocados na superfície do condutor da linha. O sensor opera em 5 V, consome 60 μA da fonte de alimentação e possui uma sensibilidade de 10.0 mV/°C. Para cada vão entre duas torres a temperatura pode variar na medida em que a LT cruza micro-ambientes com condições meteorológicas variáveis. A temperatura de um condutor aéreo nunca é conhecida com precisão e a sua medição é dificultada, mesmo quando procedimentos de imagem térmica são empregados, a qual não possui uma resolução espacial apropriada. Por esta razão, considerando os projetos de linhas de transmissão, a temperatura é sempre considerada a do pior caso e a mesma ao longo da linha, uma vez que não importa a diferença de alguns graus acima ou abaixo de uma média. Assim sendo, o valor da medida de temperatura fornecido pelo equipamento é apenas um indicativo; ou seja, é a melhor estimativa que vai atuar na determinação da flecha local.

B. Captura e Processamento de Imagens

A solução adotada para a monitoração do deslocamento da flecha, neste projeto de pesquisa, baseia-se em processamento de imagem, onde se estima o deslocamento da esfera de sinalização, comumente utilizadas pelas concessionárias nos condutores de energia, por meio de algoritmos de reconhecimento de objetos e tratamento estatístico de dados parâmetros.

As esferas de sinalização são dispositivos homologados e

largamente utilizados pelas concessionárias. Neste projeto, constituem objetos naturais para a medição da flecha, uma vez que estas se movem juntamente com os condutores de energia, ao serem estes submetidos à dilatação devido a efeitos térmicos. Levando em consideração a premissa de uma solução de baixo custo, foi definido o uso de uma câmera do tipo CFTV para capturar imagens da esfera no condutor e o desenvolvimento de um software utilizado para reconhecer a esfera na imagem e calcular o deslocamento desta durante o dia.

O Software de reconhecimento de imagem foi desenvolvido utilizando a API OpenCV para detecção do objeto esfera e a API ImageMagick++ para implementar uma série de filtros visando realçar os objetos nas imagens capturadas. Além disto, foram implementados algoritmos para calcular o deslocamento da esfera e com isso calcular a flecha do condutor. A seguir será descrita a aplicação de cada uma destas tecnologias no projeto.

A API OpenCV, *Open Computer Vision* [10], possui uma grande quantidade de métodos e algoritmos para tratar e processar imagens estáticas ou dinâmicas. No âmbito do projeto, foi utilizada a máquina de aprendizado otimizada para imagens, disponível na API, para realizar o reconhecimento da esfera. Uma máquina de aprendizado pode ser explicada como um programa para computadores que proveem otimização de critérios utilizando exemplos ou experiências passadas [11]. O processo consiste em informar, previamente, qual objeto deverá ser reconhecido em um grupo de, no mínimo, 2500 imagens contendo o objeto (imagens positivas) e outro grupo, com, no mínimo, 5000 imagens que não contenham o objeto de interesse (imagens negativas). O processo de aprendizado é altamente complexo, podendo demorar dias para ser finalizado. No caso do projeto, o período mínimo para cada cenário foi de seis dias. Como resultado, o processo de aprendizado forneceu um arquivo no formato XML (Extensible Markup Language), que é utilizado pelo aplicativo para reconhecer a esfera. Quanto maior o número de imagens positivas informadas, melhor o resultado obtido no processamento final.

A API ImageMagick++ [12], [13] foi desenvolvida com o objetivo de prover vários tipos de filtros, comumente utilizados em ferramentas de pós processamento de imagens. Como o sistema de detecção de imagens opera em ambiente aberto, ou seja, não possui iluminação controlada, tornou-se necessário fazer um tratamento inicial das imagens capturadas antes de executar o processo de detecção da esfera. O processo de tratamento da imagem consiste em: remover os ruídos de alta frequência, remover o excesso de contornos dos objetos na imagem e, por fim, destacar as bordas dos objetos que restaram na imagem. Todo este processo é fundamental para agilizar e melhorar o reconhecimento da esfera pelo OpenCV.

O sistema captura e processa 30 imagens por evento. O tempo gasto para o processamento destas imagens é de, no máximo, 5 minutos, utilizando-se o processador ATOM N270 de 1.6GHz. Após o processamento, é calculada a média do ponto central da esfera detectada em cada uma das imagens. A Figura 3, mostra uma imagem sem aplicação dos devidos tratamentos e processamentos. Já a Figura 4, apre-

senta a imagem após a realização destas atividades, onde é possível observar o ponto central da esfera, utilizado para o cálculo do deslocamento.

O algoritmo consiste em: calcular o desvio padrão do ponto central das imagens, realizando em seguida a verificação e remoção de amostras que estão fora do valor máximo do desvio padrão. Ao final, é calculada a média das posições de X, Y do centro da esfera. O desvio padrão é essencial para a remoção de falsa detecção, o que acontece devido às variações de luz durante o dia.

Como configuração inicial para o cálculo da flecha, o sistema precisa de informações, tais como: posição X, Y, altura e largura da esfera na imagem (em pixels), o diâmetro da esfera (em centímetros), a distância da esfera para a torre (em metros), a distância e a diferença de altura entre as torres (em metros), a diferença de altura do ponto de fixação do condutor na torre para a esfera (em metros) e a densidade linear de massa do condutor (kg/m). Nos testes realizados em campo, os dados relativos às posições das torres e também da esfera foram obtidos com o uso de método convencional topográfico (teodolito). Assim que a posição da esfera é medida com o teodolito, deve-se também coletar as posições da esfera na imagem.

Com todos os dados necessários obtidos, o sistema calcula a tração (H) do condutor utilizando (2). Calculado o valor da tração do condutor, a flecha é calculada usando (3).

$$H = \frac{-(V-x)w}{2(y - (\frac{x^2}{V}))} \quad (2)$$

Onde:

- H = tração do condutor
- V = distância entre as torres
- x = distância do alvo para a torre
- y = diferença de altura do alvo em relação a torre
- w = peso do cabo
- d = diferença de altura entre as torres

$$f = \frac{V^2 w}{8H} \quad (3)$$

Onde f é o valor da flecha.

Observa-se que em (2) somente será alterado o valor de y (a variação de x pode ser desprezada por ser mínima e não afetar a precisão do resultado) para calcular os valores da flecha nas novas imagens processadas. Para calcular y, é necessário converter o valor em pixels do eixo Y das imagens para valores métricos. Isto é feito utilizando (4).

$$RP = \frac{D_{esfera}}{0.5(WH)} \quad (4)$$

Onde:

- RP = relação pixel (cm)
- D_{esfera} = Diâmetro da esfera (cm)
- W = Largura da esfera (pixels)
- H = Altura da esfera (pixels)



Figura 3. Imagem da Esfera sem processamento.

As medidas da flecha ocorrem apenas no período diurno, uma vez que o sistema não possui meios para iluminar a esfera durante o período noturno.



Figura 4. Imagem da Esfera processada com o objeto identificado.

C. Sistema de Alimentação Solar

Para que o sistema possa ser instalado em uma torre da linha de transmissão, onde não existe distribuição de energia elétrica para consumidor final, foi proposto um suprimento de energia fundamentado em painel solar fotovoltaico e bateria chumbo-ácido estacionária.

Os dispositivos que compõem o conjunto de suprimento de energia foram dimensionados com o compromisso de apresentar o menor peso e dimensão possível, a fim de viabilizar e facilitar sua instalação na torre. Como premissa, o sistema de alimentação foi desenvolvido com o objetivo manter todo o sistema do projeto PD58 operando ininterruptamente por 24 horas. Tomou-se como valor paramétrico o tempo de carga de 8 horas e insolação sobre os painéis solares equivalente a 80% de sua capacidade máxima de geração.

Como não foi possível adquirir um LVD (Low Voltage Disconnect) comercial com as necessidades do projeto, optou-se pelo desenvolvimento de um dispositivo proprietário, cujas características são apresentadas a seguir.

A Figura 5 apresenta um diagrama clássico das fases envolvidas em um processo normal para recarga de baterias chumbo-ácido.

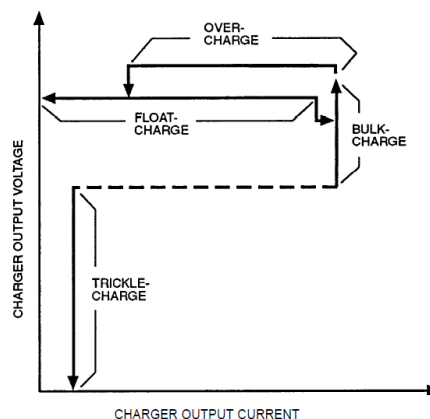


Figura 5 - Fases para recarga de bateria chumbo-ácido - O'Connor (1999, pg. 2)

No entanto, o LVD foi desenvolvido, para sua simplificação, com apenas duas fases. Na primeira fase, correspondente à fase *Bulk Charge*, a carga é realizada com corrente constante de $C/5$, de forma a ter duração típica de cinco horas, uma vez que a adoção de $C/10$ (recomendado pelas melhores práticas) teria duração de dez horas excedendo em duas o período diurno médio. Na outra fase, equivalente a *Float Charge*, a carga é feita em tensão constante para manter o nível de carga já realizado.

A fase *Trickle* foi substituída por uma funcionalidade de proteção que não permite a conexão da bateria caso sua tensão esteja abaixo da condição normal de operação da fase seguinte.

Para definição do ponto de desconexão da bateria foi adotado critérios que levam em conta a vida útil da bateria, a autonomia do sistema e a profundidade de descarga. Portanto LVD foi ajustado para desconectar a bateria com profundidade em torno de 75% da sua capacidade o que garante a autonomia pretendida e limita sua vida útil dentro de um valor aceitável de cerca de 500 ciclos, conforme apresentado na Figura 6, e cujas informações foram extraídas do manual do fabricante da bateria utilizada.



Figura 6 - Ciclo de Vida x Profundidade de Descarga

Como elementos de proteção e desligamento, foram utilizados três disjuntores monopolares com acionamento termomagnético, sendo um para bateria, um para o consumidor e outro para o painel solar. Também foram desenvolvidas proteções contra conexão com polaridade invertida tanto do painel solar quanto da bateria.

A tabela a seguir apresenta o cálculo de dimensionamento

da bateria utilizado no sistema.

Tabela I. Dimensionamento da Bateria

Definição da Bateria	Dado	Calculado	Unidade
Consumidor	3,3		A
Autonomia	24		h
Período diurno	7		h
Profundidade descarga	0,75		C
Eficiência	80		%
Tensão Nominal	12		V
Capacidade		93,50	Ah
Energia disponível		1122	Wh

ria

Para fins de ilustração, apresenta-se na Figura 7 a visão interna do armário onde foi feito o acondicionamento do sistema de alimentação.



Figura 7. Visão interna do armário do sistema de alimentação

D. Concentrador de Dados

O Concentrador de Dados é constituído por uma placa processadora mini-ITX que recebe os sinais de vídeo da câmera através de um grabber e os dados relativos às medições de temperatura e corrente dos sensores remotos via porta RS-232. Esta placa possui um processador ATOM N270 com 1G de memória RAM e 160G de disco rígido, rodando uma distribuição Ubuntu do sistema operacional Linux. Para prover o acesso remoto aos dados, o Concentrador de Dados foi equipado com um roteador Wi-Fi.

A alimentação do sistema é fornecida por uma fonte DC-DC que converte a tensão de 12V oriunda da bateria, para o padrão ATX com 3.3V, 5V, -5V, 12V e -12V. A fonte fornece 250 Watts e alimenta a placa processadora, ventiladores, roteador Wi-Fi e o sistema de recepção dos dados via fibra óptica dos sensores remotos.

Sobre o sistema Linux foi desenvolvido um software em C++ para controlar os módulos Câmera e Sensores. Este software executa os processos para captura e processamento de imagens, recepção e processamento dos dados dos sensores de temperatura e corrente e, por fim, a geração dos arquivos de log de deslocamento e desligamento.

O log de deslocamento possui 15 colunas com os dados relativos ao deslocamento da flecha, sendo:

- Valor da Flecha em metros;
- Deslocamento cumulativo da flecha em centíme-

tros;

- Posição no eixo X da esfera na imagem;
- Posição no eixo Y da esfera na imagem;
- Diâmetro da Esfera Medido;
- Relação pixel centímetros;
- Data e momento da medição no formato Ano | Mês | Dia | Hora | Minutos | Segundos;
- Corrente do Condutor;
- Temperatura do Condutor;
- Temperatura Ambiente;

O log de desligamento apresenta as informações relativas ao tempo que o sistema ficou inoperante por falta de energia. A informação consta da data e momento do desligamento do sistema e da data e momento do religamento do sistema no formato Ano | Mês | Dia | Hora | Minutos | Segundos.

Os arquivos de log são criados e atualizados em um repositório FTP, e estes podem ser coletados tanto pelo software Coletor de Dados como através de um Cliente FTP.



Figura 8. Hardware Concentrador de Dados.

E. Software Coletor de Dados e Servidor de Dados

O Coletor de Dados é um aplicativo desktop desenvolvido em C# que executa a coleta de dados, via FTP, dos Concentradores de Dados distribuídos nas torres de transmissão, para então sincronizar os dados com o aplicativo Servidor de Dados. Este por sua vez é um aplicativo WEB desenvolvido em ASP .NET e C#. O Servidor de dados possui toda a interface de usuário, como tela de login, cadastro de Concentradores de Dados, cadastro de usuários, parâmetros de manipulação dos dados, tais como limites de valores da flecha, temperatura e corrente. Como o Servidor de Dados é um aplicativo WEB, vários usuários podem fazer as consultas e visualização das informações, sem restrição de licença, limitado somente pelo desempenho do hardware do servidor, bastando utilizar um navegador WEB.

Os logs de deslocamento e desligamento coletados pelo aplicativo Coletor de Dados, ao serem sincronizados com o Servidor de Dados, são processados e armazenados no banco de dados SQL Server. Utilizando o banco, o Servidor de Dados permite que os usuários possam manipular os dados de cada um dos concentradores, utilizando filtros por data de início e fim da amostra requerida, indicando se deseja visualizar dados de corrente, temperatura, flecha, operação do

Concentrador de Dados, dentre outros. Os dados podem ser apresentados tanto na forma de gráficos ou tabelas, as quais podem ser exportadas para o aplicativo Excel.

F. Estrutura Mecânica

Para acomodar e proteger os equipamentos e fixá-los na torre de energia, foram pesquisados e testados armários com índice de proteção IP-65. Foram utilizados dois armários, sendo um para acomodar o Concentrador de Dados e o segundo para acomodar parte do sistema de alimentação (bateria e o sistema de carga desta).

Para dar suporte aos painéis solares e armários, assim como fixar estes à torre, foi desenvolvida toda uma estrutura mecânica, baseada em cantoneiras galvanizadas a fogo. Houve a preocupação de que esta estrutura pudesse ser instalada nos mais variados tipos de entrelaçamento de torres existentes em campo.

A estrutura mecânica pode ser dividida em três grupos: a base para instalação dos painéis solares, o suporte para os armários e a ancoragem na torre. A base foi desenvolvida para acomodar os painéis solares, permitindo ajustar seu ângulo de acordo com a latitude local. O suporte foi desenvolvido para fixar os dois armários, sendo este montado sobre a base. A ancoragem na torre é feita por uma série de mãos francesas que são escoradas em uma cantoneira presa à torre.

A Figura 9 apresenta uma visão frontal da estrutura mecânica instalada na torre perto da subestação de energia Caxias 1, na cidade de Caxias do Sul, e já a Figura 10 apresenta uma visão traseira da mesma.



Figura 9. Estrutura mecânica visão frontal.



Figura 10. Estrutura mecânica visão traseira.

Para fixar a câmera na torre, foi desenvolvido um suporte o qual é fixado na torre por meio de abraçadeiras BAP. A posição de fixação da câmera precisa ser o mais nivelado

possível com a esfera, para aumentar a precisão da medida do deslocamento.

III. ENGENHARIA DE PRODUTO

O sistema desenvolvido neste artigo foi realizado através de Projeto de P&D, dentro das regras da ANEEL que pressupõem uma eventual industrialização caso seja de interesse das entidades envolvidas assim como das características e sucesso do Projeto. Esta é uma das razões da participação de uma entidade industrial (a OptoLink) no desenvolvimento do Projeto.

Neste sentido, a OptoLink acompanhou o desenvolvimento em todas as fases e participou dos testes visando obter conhecimento e familiaridade com o sistema.

Como resultado destas atividades, foram gerados os documentos que possibilitam o início de uma eventual fabricação de protótipo e cabeça de série de unidades comercializáveis do sistema como um todo, ou parte dele. Estes documentos apresentam as várias unidades desenvolvidas, as suas características e especificações bem como a lista de fornecedores e documentos de construção. É incluída também uma referência completa aos documentos gerados pelas demais entidades participantes com os detalhes específicos das partes.

IV. TESTES DO SISTEMA E RESULTADOS

A. Sistema de Medição de Corrente e Temperatura

A análise completa do sistema foi realizada empregando o enlace de corrente apresentado na Figura 11. Um condutor de corrente, preparado em enlace fechado, é monitorado pelo sensor de corrente (bobina de Rogowski mais circuito integrador) e pelo sensor de temperatura, acoplado à sua superfície. A corrente desenvolvida no condutor é ajustada por meio de um transformador variável, ligado a transformadores de corrente (TC). Visto que o enlace é construído com material condutor, na medida em que a corrente é alterada, a temperatura do cabo também varia.

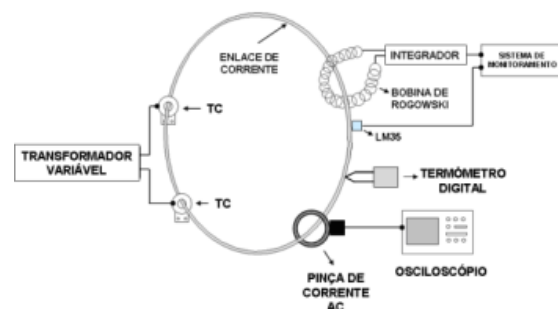


Figura 11. Esquema do dispositivo de testes do sistema de medição de corrente e temperatura.

A título de comparação, uma pinça de corrente AC, conectada a um osciloscópio digital, e um termômetro digital de precisão são alocados junto ao cabo do enlace; os valores fornecidos por esses instrumentos são considerados valores de referência, uma vez que são calibrados em fábrica.

O estudo é procedido estabelecendo no enlace de testes correntes com magnitudes entre $100 A_{RMS}$ e $650 A_{RMS}$, com

intervalos de 50 A_{RMS} . Com o intuito de simular uma operação em estado permanente, as medidas de corrente e temperatura são armazenadas com intervalos de tempo de dez minutos.

As medidas de corrente fornecidas pelo sistema de monitoramento versus os dados indicados pela pinça de corrente AC são apresentadas no gráfico da Figura 12, para quatro ciclos de medição. No eixo das abscissas estão os valores de corrente adquiridos com o instrumento comercial, enquanto que nas ordenadas estão dispostos os dados do sistema desenvolvido. O gráfico da Figura 12 é praticamente linear, apresentando um coeficiente de correlação para os quatro ciclos de medição de 0.9999. O desvio padrão máximo observado foi de 5.46, quando uma corrente 650 A_{RMS} de referência foi observada e um valor médio de 647.84 A_{RMS} foi fornecido pelo sistema projetado.

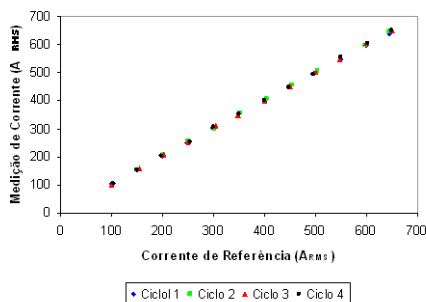


Figura 12. Calibração de corrente.

A avaliação entre os valores de referência e os valores de temperatura fornecidos pelo sistema desenvolvido é realizada sobre o gráfico apresentado na Figura 13. No eixo das abscissas, novamente, estão dispostos os dados coletados pelo instrumento de referência, e no eixo das ordenadas a informação adquirida pelo sensor de temperatura LM35, alocado na superfície do condutor e apresentada pelo sistema. A dependência linear entre os dados de temperatura medidos e os dados fornecidos pelo instrumento de referência, dada pelo coeficiente de correlação, é 0.9995; revelando assim um gráfico bastante linear, assim como o é o gráfico que trata do teste do sistema de calibração de corrente.

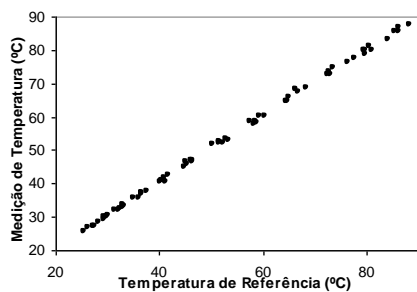


Figura 13. Calibração da temperatura.

B. Sistema de Captura e Processamento de Imagens

O teste do sistema de captura e processamento de imagens foi realizado em uma área descampada cedida por um dos colaboradores da FITec. Para simular a esfera de sinalização, utilizou-se uma bola de isopor de 20cm de diâmetro pintada na cor laranja. A esfera foi pendurada por um cabo, sendo este fixo em uma estrutura em “V”. O cabo utilizado

para sustentar a esfera foi demarcado e anelado a cada um centímetro, permitindo deslocar a esfera gradualmente.

A câmera de vídeo foi posicionada a 50 metros da esfera, e ajustada com zoom fixo e foco manual, para que não houvesse alterações na distância focal.

O sistema ficou em teste durante um período de 30 dias, sujeito a intempéries, sendo que as condições meteorológicas locais apresentaram variações de temperatura e umidade, devido à ocorrência de chuvas e geadas.

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema de detecção adotado estava robusto, considerando as variações de iluminação as quais a esfera foi submetida, alcançado precisão de 2cm no cenário apresentado.

Salienta-se que todo sistema que opera com reconhecimento de padrões e ou objetos é muito susceptível a falhas de detecção quando submetido a forte iluminação ou ausência desta, logo, o sistema em questão operou corretamente em praticamente 90% do período diurno, havendo algumas falhas de detecção quando a luz solar estava incidindo diretamente sobre a esfera e também durante a fase de penumbra (anoitecer).

C. Sistema de Alimentação Solar

O teste do sistema de alimentação foi realizado em ambiente controlado com o painel solar exposto ao sol, em ambiente externo. Nos testes realizados, utilizou-se o sistema de captura de imagens e o concentrador de dados, assim como uma carga de 15 Watts para simular o subsistema de medição de temperatura e corrente. Os resultados obtidos foram satisfatórios conforme pode ser visto na Tabela II.

A Tabela II apresenta um acompanhamento diário das condições da bateria, após sete horas de carga no período diurno e de descarga nas 17 horas restantes. Como pode ser observado nos quatro dias de teste, a bateria atingiu sua capacidade máxima (tensão de flutuação = 13,8 Vdc) durante a fase de recarga e a profundidade de descarga foi da ordem de 75% (tensão final de aproximadamente 11,5 Vdc). Outra informação importante é que o teste foi realizado em época de boa insolação, com dia bastante longo e pouca nebulosidade, de forma que o painel solar mostrou capacidade de geração suficiente para que o sistema não apresentasse nenhuma interrupção por desconexão da bateria durante a fase de descarga.

Tabela II. Teste sistema de alimentação

Teste bancada								
Dia/mês	Operação	Consumidor (A)	Início (h)	Fim (h)	Tempo (h)	Bateria Início (Vdc)	Bateria Fim (Vdc)	Painel (Vdc)
22/03	carga	3,3	9:00	16:00	07:00	11,4	13,8	18,0
22/03 a 23/03	descarga	3,3	16:00	9:00	17:00	13,8	11,5	0,0
23/03	carga	3,3	9:00	16:00	07:00	11,5	13,8	18,0
23/03 a 24/03	descarga	3,3	16:00	9:00	17:00	13,8	11,6	0,0
24/03	carga	3,3	9:00	16:00	07:00	11,6	13,8	18,0
24/03 a 25/03	descarga	3,3	16:00	9:00	17:00	13,8	11,5	0,0
25/03	carga	3,3	9:00	16:00	07:00	11,5	13,8	18,0
25/03 a 26/03	descarga	3,3	16:00	9:00	17:00	13,8	11,6	0,0

V. INSTALAÇÃO EM CAMPO E TESTES DE SUPORTABILIDADE

A. Sistema de Medição de Corrente e Temperatura

Além do desenvolvimento de isoladores cujo objetivo é a proteção de todo o sistema localizado em baixa tensão no caso de faltas na linha devido a curtos-circuitos, por exem-

plo, também há a preocupação acerca da imunidade eletromagnética dos circuitos localizados na região de alta tensão, isto é, próximos ao condutor. Após bem sucedidos testes realizados em laboratório, submetendo o sistema de medição de corrente e temperatura a campos elétricos gerados por uma tensão de 25 kV (dadas as limitações do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal do Rio de Janeiro) e a campos magnéticos gerados por correntes de aproximadamente 1000 A, o sistema foi instalado em uma linha de transmissão de 69 kV operada pela RGE, próxima a subestação de energia Caxias 1, em Caxias do Sul - RS.

Contudo, esta seção específica do sistema de avaliação de flecha apresentou falhas devido aos altos campos elétricos envolvidos. Um novo protótipo foi alocado no interior de uma caixa metálica para proteção contra os efeitos do campo elétrico, e o novo sistema foi submetido a campos condizentes com uma tensão de linha de 69 kV no laboratório de testes do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), em Nova Iguaçu - RJ.

B. Sistema de Captura e Processamento de Imagens

Para fins de ilustração, apresenta-se na Figura 14 o gráfico de deslocamento da flecha ocorrido no dia 02/07/2010, referente aos testes realizados na linha de 69 kV, próximo a subestação de Caxias 1. Neste período, o valor mínimo e máximo medido da flecha do condutor foi de 6,25 e 6,63 metros, resultando em um deslocamento total de 38 centímetros. Com base nos testes de laboratório, estima-se que o erro nas medidas seja de dois centímetros, em média.

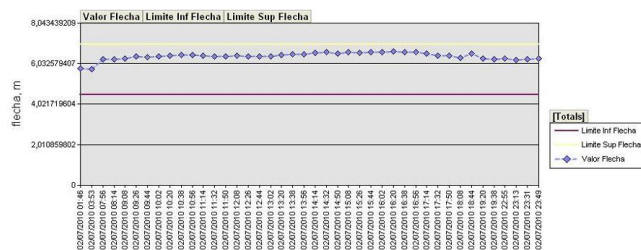


Figura 14. Gráfico Deslocamento Flecha 02/07/2010.

Apresenta-se na Figura 15 o gráfico correspondente ao deslocamento da flecha no período de 02/07/2010 à 26/08/2010. O valor mínimo e máximo medido da flecha do condutor foi de 4,8 e 6,0 metros, resultando em um deslocamento total de 1,20 metros.

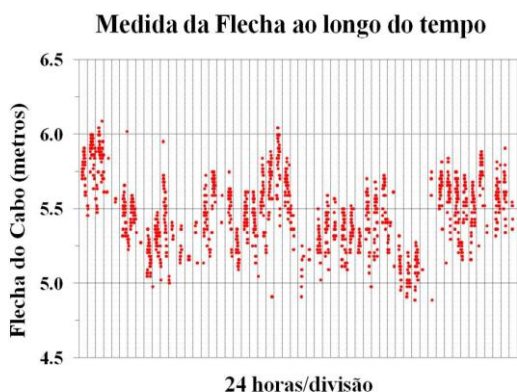


Figura 15 - Gráfico Deslocamento Flecha 02/07/2010 – 26/08/2010.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a proposta de um sistema de medição da flecha do condutor – fase de uma linha de transmissão. O objetivo do projeto foi desenvolver um sistema para captura e processamento de imagens alimentado por painéis solares, assim como sensores de temperatura e corrente com isolamento obtido por fibra óptica.

O subsistema de medição de corrente e temperatura mostrou-se capaz de fornecer dados confiáveis. Uma vez que cabos de fibra óptica de sílica são empregados nos enlaces de comunicação de alimentação elétrica, isolamento entre a cabeça do dispositivo sensor em alta tensão e a região de operação do usuário é garantida, eliminando o uso de cabecamento de cobre convencional.

A energia elétrica fornecida aos circuitos localizados na região de alta tensão é transmitida através de um enlace de fibra óptica, uma técnica conhecida como alimentação fotônica. Um circuito de baixo consumo foi projetado de forma que a capacidade de fornecimento de energia do conversor fotovoltaico de potência seja atendida. Os valores fornecidos pelos sensores foram comparados com valores de referência, estes últimos sendo fornecidos por instrumentos comerciais de laboratório; e pequenos erros foram observados, tanto para os dados de corrente como os de temperatura.

Após os testes em laboratório de alta tensão apropriado (CEPEL), o novo protótipo do subsistema de medição de corrente e temperatura apresenta-se operacional, e atualmente aguarda-se uma nova janela temporal de instalação, uma vez que é necessário o desligamento da linha para este tipo de procedimento.

O subsistema de captura e processamento de imagens apresentou resultados satisfatórios tanto na detecção da esfera, quanto na medição de deslocamento desta. Demonstrando a viabilidade do uso da tecnologia para a mediação direta da flecha.

Espera-se que os valores fornecidos pelo sistema completo instalado em linhas problemáticas permitam o conhecimento do comportamento de cada vão específico concernente ao alongamento do condutor em função da temperatura do cabo.

Como produto, o sistema possibilita a eventual industrialização do conjunto completo ou de partes do mesmo que teriam aplicações no setor elétrico ou em outras áreas industriais. Por exemplo, o subconjunto de medida de corrente via Bobina de Rogowski, remotamente alimentado via fibra óptica, teria aplicação em uma infinidade de medidas no setor elétrico/industrial, seja em linhas de transmissão, transformadores como em locais distantes fazendo uso das características de imunidade eletromagnética, isolamento assim como de baixa perda de transmissão da fibra óptica. Do mesmo modo, o sensor de posição de alvo a longa distância teria uso nas mais variadas aplicações de monitoramento sem contato de objetos.

Para projetos futuros, indica-se a pesquisa para um sistema de iluminação ou outra tecnologia para capturar as imagens durante o período noturno, bem como a otimização do sistema para processadores de baixíssimo consumo, com o intuito de reduzir todo o empacotamento do sistema.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA FILHO, J. I., RUFFIER, A. P., LISBOA, E. F. A., ESTRELLA Jr., "Cálculo das Flechas dos Condutores de Vãos Contínuos e a Avaliação da Ampacidade Estatística de LT's", X ERLAC - Encuentro Regional Latinoamericano de laCigré, Puerto Iguazú, Argentina, 18-22 de maio de 2003.
- [2] Power-Donut Sensors, Nitech, Inc. (a division of Underground Systems, Inc.), Milford, CT.
- [3] Tension Monitor [Online]. Available: <http://www.cat-1.com/>
- [4] B. Clairmont, Video Sagometer. Lenox, MA: EPRI Solutions.
- [5] C. Mensah-Bonsu, U. F. Krekeler, G. T. Heydt, Y. Hoverson, J. Schilleci, B. L. Agrawal, "Application of the Global Positioning System to the measurement of overhead power transmission conductor sag," in *IEEE Trans. Power Delivery*, vol 17, pp. 273 – 278, jan. 2002.
- [6] ShaliniSushmithaKomaragiri, and SatishM.Mahajan, "A Sag Monitoring device based on a Cluster of Code based GPS Receiver," in *PES. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. Pg. 1.
- [7] W. de Villiers, J. H. Cloete, L. M. Wedepohl, A. Burger, "Real-Time Sag Monitoring System for High-Voltage Overhead Transmission Lines Based on Power-Line Carrier Signal Behavior," in *IEEE Trans. Power Delivery*, vol 23, pp. 389 – 395, jan. 2008.
- [8] F. V. B. de Nazaré and M. M. Werneck, "Development of a Monitoring System to Improve Ampacity in 138kV Transmission Lines Using Photonic Technology," apresentada na 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, EUA, 2010.
- [9] D. A. Ward and J. L. T. Exon, "Using Rogowski coils for transient current measurements", *Eng. Sci. Education J.*, vol. 2, pp. 105-113, 1993.
- [10] Gary Bradski, Adrian Kaehler, *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. 1st ed., O'Reilly Media, 2008.
- [11] Ethem Alpaydin, *Introduction to Machine Learning*. 2nd ed, The MIT Press, 2010, p. 43.
- [12] Sohail Salehi, *ImageMagick Tricks: Web Image Effects from the Command Line and PHP*. 1st ed., Packt Publishing, 2006.
- [13] Michael Still, *The Definitive Guide to ImageMagick*, 1st ed. Apress, 2005.