

# Esquema de Automação e Gerenciamento de Energia para Redes de Canais de Água

David Dolezilek e Amandeep Kalra  
*Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

Publicado no  
proceedings of GRIDTECH 2015  
Nova Deli, India  
8–10 de abril de 2015

Apresentado previamente na  
DistribuTECH Conference, janeiro de 2014

Originalmente apresentado na  
Power and Energy Automation Conference, março de 2013

Traduzido para o português em fevereiro de 2017

# Esquema de Automação e Gerenciamento de Energia para Redes de Canais de Água

David Dolezilek e Amandeep Kalra, *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

**Resumo**—A maior parte da ênfase tecnológica em automação de potência e energia concentra-se em melhorar a segurança das operações e a eficiência da geração, transmissão e distribuição de energia. No entanto, danos, desligamentos não programados e perda de produtividade são também preocupações que conduzem à urgência na modernização do consumo de energia como parte dos processos industriais. Como exemplo, a redução de faltas e defeitos na distribuição de energia que causam interrupções nos sistemas de fornecimento de água aumenta significativamente a segurança pessoal, eficiência do processo e, como resultado, a produção agrícola.

As soluções de água incluem fluxo diferencial e prevenção de inundações, similar aos esquemas de sobrecorrente e diferencial de corrente de linha usados nos sistemas de potência. Os sistemas de automação do controle do canal de água têm que monitorar e controlar precisa e simultaneamente o fluxo tanto da água quanto da energia necessária para o fornecimento da água. Para atingir este objetivo, são necessárias soluções de automação mais eficientes e inteligentes nas aplicações de transporte de água. Os dispositivos, algoritmos lógicos e as comunicações dos sistemas de automação já não são mais limitados a escolhas do processo específico. As soluções modernas combinam o gerenciamento de energia e do processo para uma utilização eficiente da energia e os novos dados e serviços que são entradas inestimáveis para a segurança e eficiência da automação do processo. Este é um benefício óbvio para muitas concessionárias que gerenciam sistemas de água e energia em paralelo. A combinação da proteção e automação de ambos os processos em um só sistema fornece melhores informações para a tomada de decisão, facilidade de operação e custos menores. Ao mesmo tempo, a nova e revolucionária gestão do processo torna-se disponível através da integração do conhecimento e do controle do sistema de distribuição de energia que conduz os processos industriais. Este processo combinado de automação e gerenciamento de energia é agora efetuado com a mesma tecnologia de automação multifuncional inteligente e robusta que atualmente executa a proteção e automação dos sistemas de potência industriais e de concessionárias.

Este artigo descreve os benefícios da aplicação da tecnologia multifuncional nos sistemas de automação de controle dos canais de água. De forma similar a uma aplicação de distribuição de energia, protocolos de comunicação, lógicas padronizadas e dispositivos robustos são usados para monitorar e controlar o fluxo de água, gerenciando ao mesmo tempo a energia necessária para o processo. Sistemas de controle precisos e confiáveis protegem as equipes de trabalho contra defeitos elétricos e mau funcionamento de equipamentos. Como resultado, a operação do processo é mais segura, mais confiável e econômica. Além disso, o tempo de interrupção do sistema é reduzido significativamente. O esquema de comunicações seguras mantém a confidencialidade dos dados, proporcionando ao mesmo tempo um link confiável entre os locais remotos e o console de controle centralizado. Os recursos de suprimento de energia de retaguarda garantem a distribuição contínua de água e operações seguras à prova de falhas (“fail-safe”) durante interrupções de energia. A solução

também incorpora a comunicação BLUETOOTH® visando fornecer uma interface homem-máquina (IHM) de baixo custo e flexível e uma interface para diagnóstico do operador via aplicações de laptop portátil e tablet. Este display de operação redundante é separado tanto da IHM local quanto do sistema de controle superviso e aquisição de dados (“Supervisory Control And Data Acquisition” – SCADA). A solução efetua a troca das informações para tomada de decisão entre os locais de monitoramento, controle e operador visando reagir automática e precisamente às variações dinâmicas do sistema de água em tempo real. Esta solução representa uma melhoria substancial em relação aos métodos atualmente usados com dispositivos isolados e baseados em algoritmos fixos sem informações dos locais adjacentes.

## I. INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais importante e tem grande valor social, econômico e ambiental. Tudo o que usamos diariamente em nossa vida tem uma pegada (“footprint”) de água. Por exemplo, a eletricidade que geramos, o papel que usamos, o alimento que comemos e as roupas que vestimos, todos dependem de água. A variabilidade da chuva e as mudanças nas condições climáticas resultaram na escassez de água em cada vez mais partes do mundo, conforme evidenciado por mudanças nas camadas de neve, nível do mar e no fluxo dos rios. Por exemplo, a região nordeste da Península Ibérica perto de Girona, Espanha, tem experimentado uma seca extrema nos últimos anos [1]. E os países da Ásia Ocidental e do Norte da África terão em breve que desviar a água de irrigação para suprir as necessidades industriais e domésticas [2]. Vários períodos de seca e crises de água em diversas partes do mundo reforçaram a importância de uma gestão eficiente dos recursos da água que flui através de canais abertos. De acordo com um levantamento efetuado por pesquisadores da Universidade de Twente, Holanda, a agricultura representou 92% do *footprint* médio da água global no período de 1996 a 2005 [3]. Os sistemas antigos de distribuição de água de irrigação são baseados nos métodos tradicionais de intervenção humana e monitoramento impreciso que resultam em uma enorme perda de água devido a vazamentos e obstruções despercebidas no canal. O monitoramento e o controle preciso do fluxo de água são fundamentais para uma gestão eficiente dos recursos hídricos.

Devido à natureza dinâmica do fluxo da água, a distribuição de água não pode ser controlada baseando-se em uma equação fixa. Ao invés disso, são necessários sistemas de controle inteligentes em tempo real. O controle da distribuição de água é como um controle de distribuição de energia

elétrica, que é enormemente melhorado quando são adicionados esquemas de automação e comunicação de um sistema amplo.

No passado, as estratégias de controle e proteção baseadas em um circuito fechado (“closed-loop”) para os sistemas elétricos de potência eram isoladas para redes com dispositivos eletrônicos inteligentes (“Intelligent Electronic Devices” – IEDs) instalados, onde a comunicação permitia uma troca rápida de dados para controle e *feedback*. Atualmente, os controladores de automação e comunicação distribuídos propiciam a automação baseada em circuito fechado de todo o sistema de distribuição de energia elétrica. Os sistemas de distribuição de água podem ser automatizados e melhorados da mesma forma usando uma tecnologia similar. Com o uso de controladores de automação robustos de alta velocidade e sistemas de comunicação sem fio (“wireless”) confiáveis, a distribuição de água está sendo modernizada para se tornar mais capaz, eficiente, precisa e confiável. Sensores de fluxo independentes (“standalone”) e controladores de comporta são incrementados com lógicas de automação de circuito fechado que dependem da comunicação entre as estruturas da entrada principal (tomada d’água) e saída de água da comporta. Os dados das operações em tempo real, diagnósticos da infraestrutura e informações de qualidade das condições de operação são coletados, analisados e automaticamente postos em prática e apresentados ao operador. Portanto, sob a perspectiva dos engenheiros de automação, há uma grande similaridade entre o controle operacional do fluxo de água e do fluxo de energia.

Este artigo descreve como a tecnologia existente desenvolvida para a transmissão segura, confiável e eficiente de energia pode ser usada para medir, monitorar e controlar o fluxo de água através de canais abertos. A maioria dos avanços no setor agrícola relacionados à automação foi efetuada na melhoria dos processos de aragem, colheita e processamento da safra. Este artigo fornece uma perspectiva moderna para a gestão eficiente dos recursos de água e energia como um processo agrícola, discutindo o seguinte:

- Um sistema de monitoramento e controle do fluxo convencional.
- Uma analogia do sistema de água com o sistema de potência.
- Um sistema de automação multifuncional, dinâmico e eficiente para o monitoramento e controle do fluxo de água através de canais abertos e a energia associada consumida pelo processo.
- De que forma os rádios operando em uma topologia de circuito em anel dual (“dual-ring loop”) permitem o cálculo do fluxo diferencial de água, similar a um cálculo de corrente diferencial.
- A detecção rápida de condições de vazamento, refluxo e obstrução do canal.
- Os benefícios característicos de uma solução moderna de distribuição de água.

- Oportunidades de pesquisas futuras que incluem a otimização do uso de água e energia nos campos, combinando informações climáticas, informações do conteúdo da água do solo, medição do uso de água em tempo real e a redução dos custos operacionais por meio da melhoria do processo de mistura de fertilizantes, fornecendo a capacidade de misturá-los nos pontos de distribuição de água.

## II. SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO DO FLUXO CONVENCIONAL

O monitoramento do fluxo tradicional dos canais abertos tem sido feito monitorando-se os níveis de água (estágios) através de um medidor tipo “staff gauge” (régua de medição vertical) como alternativa. Uma relação nível-descarga é calculada usando medições de descargas periódicas no local através de uma régua com níveis de água e medição do tempo visando desenvolver uma curva de classificação. Em locais com variação de água represada (“backwater”), tais como sistemas de controle da comporta de irrigação, não se pode obter uma relação nível-descarga confiável. Nesses locais, uma relação velocidade-índice é normalmente usada. A relação velocidade-índice é fornecida por um estudo da seção transversal entre o nível e a área da seção transversal [4]. Baseando-se nas medições de vazão, é desenvolvida uma equação de fluxo correspondente à geometria de um canal aberto específico, fornecendo uma taxa de fluxo aproximada correspondente aos diferentes níveis de água de um canal aberto. A posição da comporta de irrigação é ajustada manualmente para compensar o fluxo alvo requerido, girando o volante em cima da comporta. A eficiência do sistema é muito dependente de medições precisas de vazão e cálculos geométricos precisos para o canal aberto.

Os métodos discutidos têm várias deficiências, conforme mostrado a seguir:

- Cálculos de fluxo ineficientes devido aos processos assíncronos e estáticos de monitoramento da água.
- Visitas periódicas no local necessárias para calibrar a posição da comporta para a taxa de fluxo requerida.
- Perda de água não detectada ao longo do canal aberto devido a um vazamento no canal.
- Sem acesso remoto para monitoramento e controle da instalação.

Essas deficiências não apenas resultam numa gestão ineficiente dos recursos hídricos, mas também aumentam os custos operacionais. Condições de inundação não detectadas no canal aberto resultam em danos às estradas e plantações, causando um impacto na segurança e economia.

A Fig. 1 mostra um sistema de controle de uma comporta de irrigação convencional com um volante rotativo para controlar a abertura da comporta e, conseqüentemente, o fluxo através do canal aberto.



Fig. 1. Sistema de Controle do Fluxo do Canal Aberto Convencional

Considerando a crescente demanda por recursos de água doce e a necessidade de manter a produção agrícola nos níveis atuais, há uma maior necessidade de quantificar melhor o fluxo do canal. Existe também uma nova demanda para quantificar o fluxo em canais menores, tais como os ramais de irrigação. Com o desenvolvimento dos sensores de fluxo baseados em *Doppler* e o avanço dos sistemas de automação na última década, melhorias substanciais possibilitam agora efetuar o monitoramento e o controle do fluxo de água de forma eficiente, econômica e previsível.

### III. ANALOGIA COM O SISTEMA DE POTÊNCIA

Se compararmos as hidrovias de canais abertos com as linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, a medição do fluxo de água pode ser então considerada análoga à medição de um transformador de corrente. O fluxo de água é medido como a quantidade de água que flui através de um ponto ao longo do tempo — a taxa de fluxo,  $Q$ . O fluxo elétrico em um fio é medido como a quantidade de carga que flui através de um ponto ao longo do tempo — a taxa do fluxo de carga ou corrente,  $I$ . Nesta analogia, um canal aberto atua como um condutor, similar a um alimentador de distribuição, responsável por transportar a corrente (fluxo de água) do Ponto A para o Ponto B. As comportas de água usadas para controlar o fluxo da água vinda do lado a montante (o lado com o nível de água mais alto) para o lado a jusante (o lado com o nível de água mais baixo) atuam como transformadores de distribuição. Nos sistemas de potência, a tensão no lado de baixa tensão (a jusante) é manipulada alterando-se o número de enrolamentos (posição da comporta) do transformador (comporta de irrigação) através de um comutador de taps sob carga (“Load Tap Changer” – LTC). De forma similar, o fluxo de água do canal aberto no lado a jusante é controlado pela manipulação da altura da abertura da comporta.

Adicionalmente, a relação entre o fluxo de água, nível de água e o canal é similar à relação entre a corrente elétrica, tensão e o condutor. Conforme discutido na seção VIII, condições de alagamentos são evitadas e/ou monitoradas pelo cálculo do fluxo diferencial do canal para reduzir o risco de inundação, manipulando-se o fluxo de água a montante (entrada de água). A grande similaridade entre os dois processos permite aplicar a tecnologia de automação e

comunicação desenvolvida para a indústria de energia, visando modernizar a aplicação do controle do fluxo de água.

### IV. REQUISITOS TÍPICOS DO SISTEMA

Alguns distritos de irrigação estão modernizando seus antigos sistemas de transporte de água e começaram a usar as tecnologias disponíveis para monitorar e controlar o fluxo de água através de canais abertos. Os requisitos e as funcionalidades de um sistema típico de controle de água incluem o seguinte:

- Monitoramento contínuo da taxa do fluxo de água.
- Sensores a montante e a jusante para cálculo da altura diferencial (“differential head”).
- Controle e monitoramento local e remoto dos canais abertos.
- Um sistema centralizado de controle superviso e aquisição de dados (SCADA) para controle do operador e produção de relatórios.

Estes requisitos são semelhantes aos métodos SCADA remotos de sistemas de potência desenvolvidos há algumas décadas.

### V. MELHORIA DAS CAPACIDADES DO SISTEMA

Como os dispositivos de controle de fluxo são instalados em campo aberto, eles são expostos a condições extremas de temperatura. A maioria dos dispositivos de hardware de controle atualmente usados na indústria de água não satisfaz às exigências ambientais de certas partes do mundo. Como a indústria de energia tem requisitos superiores de segurança, confiabilidade e desempenho quando comparada à indústria de água, as aplicações de controle de fluxo são revolucionadas com o uso da tecnologia robusta desenvolvida para a indústria de energia. As redes baseadas na tecnologia de informação e controle (“Information and Control Technology” – ICT) para automação da energia suportam processamentos locais avançados, bem como o controle de uma área ampla em circuito fechado, assistido pelas comunicações. Além disso, os recursos dos produtos da indústria de energia, tais como hardware robusto, tolerância da faixa de temperatura estendida e tempo de vida do produto prolongado melhoram drasticamente a confiabilidade das operações de controle da água, uma vez que os locais de controle do fluxo estão sujeitos às mesmas condições ambientais e normas físicas. Adicionalmente, os atributos gerais da indústria, tais como o excelente suporte técnico e garantia estendida dos produtos manufaturados, oferecem um nível mais elevado de suporte do que o atualmente disponível no mercado de automação de água relativamente desorganizado.

A operação análoga de energia e água trará constante inovação para a indústria da água de irrigação. Os fatores descritos anteriormente também trarão melhorias funcionais para o sistema, tais como indicado a seguir:

- Aquisição local e remota, armazenamento e exibição das informações de consumo de energia para o processo subjacente.

- Controle do fluxo automatizado de um valor alvo definido pelo usuário para a taxa de fluxo do canal usando as capacidades dos controladores conforme IEC 61131.
- Comunicação segura e confiável com o sistema de controle centralizado, bem como entre os locais de monitoramento e controle.
- Operações de transporte de água melhoradas com a detecção rápida de vazamento, escoamento lento e obstrução do canal através do fluxo diferencial do canal de forma similar ao diferencial de corrente.
- Prevenção de inundação do canal aberto similar à proteção de sobrecorrente e sobretensão do sistema de potência.
- Dados redundantes exibidos nos consoles do operador, tablets e telefones inteligentes (“smartphones”).

## VI. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Para a gestão eficiente dos recursos hídricos, propomos um sistema de controle do fluxo de água que incorpore recursos de sistemas avançados. O sistema proposto consiste de comportas de irrigação equipadas com atuadores elétricos. Os atuadores são integrados através de várias entradas e saídas digitais e analógicas, tais como o status da comporta, posição da comporta, controle da comporta, e assim por diante, a uma interface de I/Os de um controlador de automação local com recursos de comunicação e capacidades lógicas conforme IEC 61131. O controlador de automação efetua o monitoramento da água usando um sensor de fluxo ou medição do nível diferencial e o monitoramento da energia medindo as correntes e tensões em tempo real nos equipamentos do processo. O usuário interage com o sistema de vários modos através de um servidor SCADA centralizado, display do terminal de interface do operador (“Operator Interface Terminal” – OIT) local, anunciador local com diodos emissores de luz (LEDs) ou chaves manuais. Cada instalação está equipada com uma interface BLUETOOTH® para fornecer monitoramento *wireless* no local através de um laptop, tablet ou smartphone. O recurso BLUETOOTH reduz o tempo gasto no campo ao propiciar um monitoramento simples e rápido de cada local. Ele também melhora a segurança e o conforto pessoal durante temperaturas extremas e em locais perigosos, uma vez que os dispositivos de campo podem ser acessados por um técnico dentro de um veículo de serviço.

O SCADA e o sistema de acesso remoto se comunicam através de rádios seriais operando ao longo de um espectro de frequências não licenciadas (900 a 928 MHz), visando proporcionar a aquisição segura de dados para o sistema de controle centralizado e estação de trabalho de engenharia. O sistema registra, de forma redundante, os dados no controlador de automação, bem como no servidor SCADA centralizado. Esses dados são facilmente restituídos e visualizados.

A Fig. 2 mostra um painel da estação de controle de fluxo.

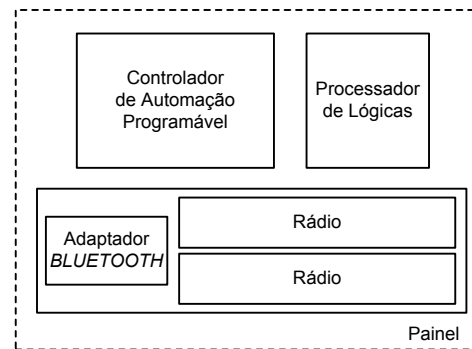


Fig. 2. Painel da Estação de Controle de Fluxo

O sistema possui redundância de camada dupla nos níveis de hardware e software, garantindo operações à prova de falhas (“fail-safe”). Dispositivos com múltiplas funções suportam a flexibilidade de redundância de hardware e software para efetuar tarefas específicas de várias maneiras, aumentando assim a confiabilidade geral do sistema de controle. As operações redundantes estão indicadas na Tabela I.

TABELA I  
OPERAÇÕES REDUNDANTES DO SISTEMA

Funcionalidade	Componente Primário	Componente Redundante
Aquisição de dados	Sensor de nível primário	Sensor de nível secundário
Display de dados	OIT, interface homem-máquina (IHM), anunciador com LEDs no painel frontal	Tablet ou smartphone
Armazenamento de dados	Controlador de automação	Servidor centralizado
Alarme	OIT, SCADA, anunciador com LEDs no painel frontal	Mensagens multimídia (MMS) via telefone celular ou email

## VII. TOPOLOGIA DE COMUNICAÇÕES

Os sistemas modernos baseados na ICT dependem amplamente das comunicações para que elementos discretos do sistema de controle efetuem coletivamente tarefas específicas. Devido às funções críticas executadas pelos sistemas de controle, é necessário ter muito cuidado com a segurança, confiabilidade e disponibilidade ao projetar um esquema de comunicação. O sistema proposto fornece comunicação redundante ou de retaguarda para os dados do SCADA utilizando múltiplos canais de rádios. As instalações se comunicam através de uma topologia em anel dual (“dual-ring”), como mostrado na Fig. 3. O primeiro anel fornece comunicação ponto-a-ponto (“peer-to-peer”) entre várias instalações e utiliza o protocolo de comunicações MIRRORED BITS® em função das vantagens de baixa latência, baixo custo e troca de dados direta e simples [5]. Uma característica importante deste protocolo de comunicação MIRRORED BITS *peer-to-peer* consiste no envio constante de dados em ambas as direções ao redor do anel. Isso garante uma entrega rápida e

redundante de todas as informações e uma operação correta, mesmo no caso de falha de um dispositivo ou link. O segundo anel atua como um canal dedicado para as comunicações do SCADA e usa o protocolo DNP3 devido às suas vantagens de mínimo *overhead* de mensagens (“low message overhead”), *buffering* de eventos e estampas de tempo dos registros de dados [6].

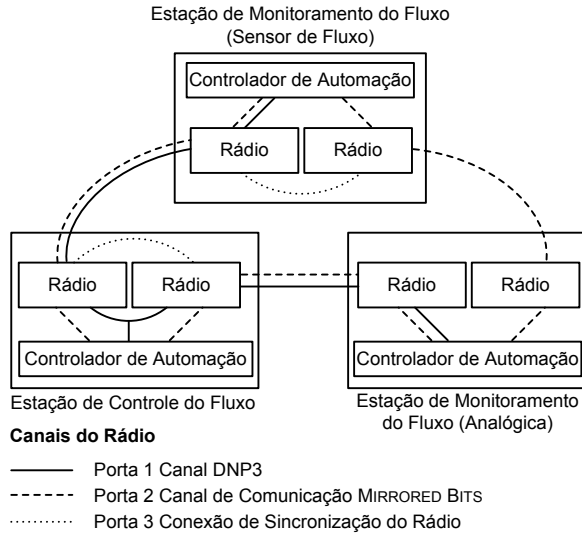


Fig. 3. Topologia em Anel Dual

Há inúmeras vantagens ao usar a topologia de anel dual, incluindo as seguintes:

- Múltiplos canais entre as instalações fornecem redundância do duplo anel para uma comunicação mais confiável e sem ponto único de falha.
- Cada local tem acesso igual aos recursos, resultando em uma rede mais flexível e automação mais sofisticada.
- O carregamento de dados entre os locais é compartilhado por múltiplos canais para um desempenho consistentemente aprimorado e balanceamento do fluxo de dados.

As medições simultâneas e a troca de dados do fluxo de diversos locais suportam o cálculo inovador do fluxo diferencial do canal. Os cálculos do fluxo diferencial do canal têm as seguintes vantagens:

- Eles medem e registram dinamicamente os vazamentos como uma característica do canal para diferentes níveis de água. Um vazamento (escoamento) típico reflete o “carregamento” do canal em um certo nível de água antes de suportar o fluxo.
- Eles detectam uma taxa de fluxo não compatível entre canais abertos interconectados, visando ajudar na detecção antecipada de falhas, tais como vazamento e obstrução do canal atípicos.
- Eles permitem o transporte eficiente de água através dos canais abertos.

A comunicação em anel dual permite a comunicação *peer-to-peer* independente, rápida e redundante para uma automação inovadora e algoritmos baseados em circuito

fechado, suportando também, ao mesmo tempo, o acesso da engenharia e SCADA centralizado.

## VIII. TERMINOLOGIA E ALGORITMO DE CONTROLE

A indústria de água, como em toda indústria, tem sua própria terminologia. Mesmo que os processos sejam modernizados com o tempo, a velha terminologia permanece devido à conveniência do entendimento que se desenvolveu ao longo do tempo entre os operadores e técnicos. A terminologia encontrada durante as aplicações de controle do fluxo é a seguinte:

- Altura diferencial (“differential head”) é a diferença entre os sensores de nível a montante e a jusante.
- Montante é a direção do canal aberto contra o fluxo.
- Jusante é a direção do canal aberto no sentido do fluxo.
- Refluxo (“backflow”) é quando a água inverte a direção a jusante.
- Fluxo alvo é a taxa de fluxo requerida num ramal.
- A unidade do fluxo de água é pés cúbicos por segundo (“cubic feet per second” – CFS).
- Taxa de fluxo é a quantidade de água que flui através do canal em CFS.
- Erro do fluxo é a diferença entre a taxa de fluxo atual e a taxa de fluxo requerida.
- Erro da comporta (em pés) é a diferença entre a posição atual e a posição alvo da comporta.
- Acre-pé (“acre-foot”) é o volume de água numa área com superfície de um acre e profundidade de um pé.
- Volume totalizado é o volume de água durante um período de tempo em acre-pés (“acre-feet”).

O processador lógico local monitora o sinal analógico de um sensor de nível e calcula a taxa de fluxo média dentro de um intervalo de tempo fixo, porque o fluxo de água é muito turbulento e existem picos imprecisos nos dados do fluxo bruto em tempo real.

O erro da comporta é linearmente relacionado ao erro do fluxo. Idealmente, o erro da comporta e o erro do fluxo devem ser zero, exceto quando uma comporta está mudando de posição. No entanto, considerando a porcentagem de tolerância de todos os componentes mecânicos, o erro da comporta é quase zero. No modo manual, as comportas esperam pelo comando do usuário para ajustar sua posição. Enquanto estiver no modo automático de operação, um erro do fluxo diferente de zero resulta no comando de movimento automático das comportas em uma determinada direção.

Os atuadores elétricos consistem numa escolha óbvia para serem usados com as comportas de irrigação, pois eles exigem menos manutenção e são mais confiáveis do que os atuadores pneumáticos e hidráulicos. O fornecimento de água depende enormemente do fornecimento de energia elétrica confiável para tais atuadores. As interrupções no fornecimento de energia deterioram a distribuição de água para os campos. O sistema proposto inclui a lógica de medição de energia baseada em medições de corrente e tensão apropriadas. Vários alarmes relacionados ao sistema de potência, tais como falta

de energia, falta de fase e detecção de sobrecorrente estão incluídos para tornar a aplicação mais segura e confiável, protegendo os equipamentos contra danos. Por exemplo, a perda de uma única fase para um motor trifásico pode resultar em aquecimento excessivo nos enrolamentos do motor antes da detecção de sobrecarga térmica, uma vez que está absorvendo toda a energia das duas fases restantes. Além disso, a tentativa de partir um motor trifásico com uma única fase pode fazer com que o motor absorva uma corrente de rotor travado, e o motor não vai partir.

#### A. Cálculo do Fluxo do Canal

Os controladores baseados na norma IEC 61131 fornecem cálculos rápidos e precisos das taxas de fluxo e dos algoritmos de controle do fluxo. Os canais de distribuição de irrigação são pequenos em tamanho, tornando difícil a instalação de sensores baseados em *Doppler*. Para atingir a precisão necessária na medição do fluxo, sensores de montante e jusante podem ser usados para calcular o fluxo com base na altura diferencial (“differential head”), usando uma equação de fluxo.

Um local típico para medição do fornecimento usará uma equação de orifício de fluxo submerso, tal como (1).

$$Q = C_d \cdot A \cdot C_c \cdot H^{0.5} \quad (1)$$

onde:

$Q$  é a taxa de fluxo em CFS.

$C_d$  é o coeficiente de descarga do canal (adimensional).

$A$  é a área do orifício em pés quadrados.  $A = OW \cdot OH$ , onde  $OW$  é a largura do orifício em pés (determinado através do OIT ou SCADA) e  $OH$  é a altura da abertura em pés (através do medidor de posição “string pot” ou potenciômetro).

$C_c$  é a constante da equação para o tipo particular de local ou canal.

$H^{0.5}$  é a altura diferencial em pés para fluxo submerso.  $H$  é a diferença entre os níveis de montante e jusante [7].

```
//Calculates flow using the orifice equation
Diff_Head := (AVG_US_LEVEL-AVG_DS_LEVEL); //Differential head calculation
IF(Diff_Head < 0 OR Diff_Head = 0) THEN //If upstream level is less than downstream level
    QVALUE :=0; //Zero flow condition
    AL_Diff := TRUE; //Set low differential head alarm
ELSE //Compute flow using orifice equation
    QVALUE:= Dis_Coeff*(GATE_WIDTH)*(GATE_POS)*(Eq_Var)*EXPT(Diff_Head, 0.5);
    AL_Diff := False; //Sufficient differential head
END_IF
```

Fig. 4. Lógica de Cálculo do Fluxo

A lógica de cálculo do fluxo correspondente em texto estruturado está mostrada na Fig. 4.

A seguir, as definições dos termos usados na Fig. 4:

- Diff\_Head é a altura diferencial.
- AVG\_US\_LEVEL é o nível médio do lado de montante.
- AVG\_DS\_LEVEL é o nível médio do lado de jusante.
- Dis\_Coeff é o coeficiente de descarga.
- GATE\_POS é a abertura atual da comporta.
- GATE\_WIDTH é a largura da comporta.
- AL\_Diff é o alarme de baixa altura diferencial.

A Tabela II define alguns modos de operação.

TABELA II  
MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA

	Modo Local	Modo Remoto
Modo Automático	Processador lógico	Processador lógico
Modo Manual	Chave manual, OIT	Tela do SCADA

#### B. Fluxo Diferencial do Canal

A Lei das correntes de Kirchhoff afirma, “A soma das correntes entrando num ponto tem que ser igual a soma das correntes saindo do ponto. Assim, a soma algébrica de todas as correntes em um ponto é zero” [8]. Usamos a mesma lei para as condições de água fluindo através de uma rede de canais abertos. Podemos afirmar que a soma da água que entra em uma rede de canais abertos é igual à soma da água que sai da rede de canais. Se a diferença da taxa de fluxo da água for superior à perda de água esperada, tal como a de um vazamento típico indicando a existência de falha, vazamento ou obstrução do canal, ocorrerá um alarme.

A Fig. 5 detalha uma rede de canais abertos em forma de T. Os três locais mostrados na figura se comunicam entre si, assim como com o servidor centralizado. Esta topologia de comunicações em anel fechado permite a detecção rápida de ocorrência de falhas.

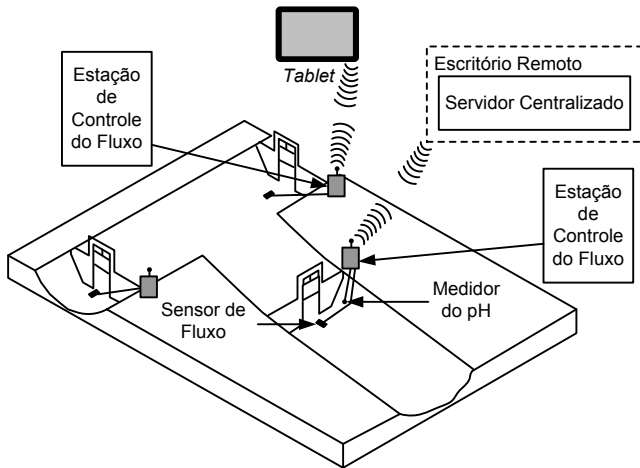


Fig. 5. Visão Geral do Sistema Completo

## IX. CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

A solução proposta fornece muito mais funcionalidades do que as soluções existentes de gestão de água.

### A. Monitoramento

O monitoramento paralelo de água e energia é executado em tempo real. Isso proporciona mais visibilidade da integridade do sistema e ajuda na detecção precoce de faltas no sistema de distribuição de energia. Cálculos do fluxo de água de alta precisão recentemente disponibilizados possibilitam a detecção rápida de falhas no sistema de transporte de água.

#### 1) Monitoramento do Consumo de Água

O sistema monitora a taxa de fluxo de água através do canal em tempo real usando a altura diferencial dos sensores de nível a montante e a jusante. Este sistema calcula e registra o fluxo diário, mensal e anual, disponibilizando as tendências históricas do fornecimento de água.

Os cálculos diferenciais e de sobrefluxo fornecem um alerta antecipado de condições inadequadas dos instrumentos ou de defeito em um canal.

#### 2) Monitoramento do Consumo de Energia

O sistema monitora continuamente a energia consumida pelos atuadores e fornece a oportunidade de prever ou detectar problemas mecânicos, melhorando a confiabilidade e a segurança das operações. Além disso, o consumo inesperado e contínuo de energia por um motor é usado para criar um alarme de mau funcionamento.

### B. Controle

Uma operação de controle baseada em circuito fechado é executada pelo sistema para gerenciar precisamente o fluxo de água e energia. Isso ajuda a reduzir o desperdício de recursos hídricos, otimizando ao mesmo tempo a potência consumida.

#### 1) Controle do Fluxo de Água

O sistema controla o fluxo de água através do controle da posição das comportas de água baseando-se nos comandos efetuados pelo usuário ou baseando-se no erro do fluxo durante a operação no modo automático. Além disso, ele detecta a falha, vazamento ou obstrução do canal.

#### 2) Controle do Fluxo de Energia

O sistema monitora continuamente a energia consumida pelos atuadores e fornece a oportunidade de reduzir o consumo de energia, otimizando o número de comportas ativas para condições de baixo fluxo. Isso resulta em menor desgaste dos componentes mecânicos, reduzindo os custos de manutenção.

### C. Programação

#### 1) Cronograma do Fornecimento de Água Automatizado

O sistema automatiza o fluxo de água ao longo dos ramais de fornecimento de uma determinada região. O sistema automaticamente ajusta as posições da comporta de irrigação após intervalos fixos pré-programados visando atingir uma meta da taxa de fluxo. Cada notificação de alteração é enviada para as autoridades de irrigação e para o usuário.

#### 2) Cronograma de Fornecimento de Água Baseado na Demanda

Os dados do sistema são acessados via internet num *website* seguro, que fornece aos agricultores ou usuários a possibilidade de se conectar com credenciais adequadas e alterar o fornecimento de água com base nas suas necessidades. Este sistema de fornecimento de água baseado na demanda resulta em operações suaves com interferência mínima do usuário.

#### 3) Cumprimento do Contrato de Fornecimento de Água

Cálculos precisos do fluxo de água nos lados de montante e jusante ajudam nas comparações, anteriormente indisponíveis, entre o fornecido e o contratado. Mesmo em casos onde a comporta de montante é controlada por outro distrito, uma estação de monitoramento com as mesmas características e precisão pode ser instalada. A leitura consistente, precisa e exata do fluxo de água em cada comporta suporta a validação do fornecimento de água através do sistema e a comparação com as obrigações contratuais.

## X. BENEFÍCIOS DO SISTEMA

Além dos benefícios técnicos, tais como acesso remoto e medições precisas de água e energia, as características do sistema fornecem benefícios econômicos a longo prazo. O sistema é também útil das seguintes maneiras:

- Medição de faturamento. A medição de energia em todas as instalações ajuda os gerentes a calcularem os custos associados às operações de fornecimento de água. O conhecimento dos custos operacionais permite melhorar a eficiência operacional global através da identificação dos equipamentos e instalações menos eficientes.



- Gestão de ativos. O sistema proporciona mais visibilidade da aplicação, ajudando os usuários a prever e detectar os prováveis nós de falha.
- Programação da manutenção. O monitoramento contínuo e detalhado da aplicação ajuda a efetuar uma melhor programação da manutenção, aperfeiçoando assim a segurança das operações de água. Além disso, os equipamentos são programados para manutenção ou substituição quando estiverem fora de serviço.
- Tomada de decisão. Todos os benefícios fornecem gerenciamento de alto nível para decisões mais rápidas e mais eficazes baseadas em análises estatísticas.

#### XI. OPORTUNIDADES FUTURAS

Outras melhorias são disponibilizadas através dos recursos avançados adicionais de hardware e software dos IEDs que foram desenvolvidos para o fornecimento de energia elétrica de forma segura, confiável e econômica. Melhorias potenciais sofisticadas na automação do canal incluem mas não estão limitadas ao seguinte:

- Informações climáticas e de precipitações via estações meteorológicas.
- Conteúdo da água do solo via sensores de umidade.
- Qualidade da água via sensores de PH e oxigênio.
- Saúde da colheita via sensores nas plantações.

Para combater o impacto do aumento de custos devido a locais com métodos de cobrança baseados no tempo de uso, o fluxo de água pode ser programado durante os períodos fora de pico. Adicionalmente, locais com substancial altura diferencial podem ser integrados com microturbinas de geração hidráulica, que podem tornar as instalações de controle de água autossustentáveis e potencialmente fornecer energia de volta para a rede.

Elevadas quantidades de dinheiro são investidas na pulverização de fertilizantes usando aviões de pequeno porte. Este custo pode ser eliminado através da mistura de fertilizantes na água no ponto de entrega. Este método econômico e eficiente propicia uma entrega mais direcionada de fertilizantes e fornece potencial para detectar e manipular a quantidade ideal a ser entregue.

#### XII. CONCLUSÃO

Para melhorar o desempenho dos sistemas existentes de fornecimento de água através de canais abertos, os distritos de irrigação têm que entender os desafios futuros da crescente demanda de água, regulamentações rígidas e métodos de cobrança baseados no tempo de uso para a energia consumida. A solução de automação da gestão simultânea de energia e água descrita neste artigo fornece benefícios significativos do sistema em relação aos métodos de monitoramento e controle de fluxo convencionais. A solução de automação avançada melhora a segurança, confiabilidade e controlabilidade do fluxo de água e energia consumida pelo processo.

#### XIII. REFERÊNCIAS

- [1] M. J. Cook, N. Tarafa, F. Bueno, A. Alonso-Martirena, and J. J. Villegas, "The Use of Acoustic Doppler Sensors to Improve Flow Measurements During Drought Conditions in Spain," presented at the U.S. Society for Irrigation and Drainage Professionals Conference, Sacramento, CA, March 2010.
- [2] T. Oweis, A. Hachum, and J. Kijne, *Water Harvesting and Supplemental Irrigation for Improved Water Use Efficiency in Dry Areas*, International Water Management Institute, SWIM Paper 7, Colombo, Sri Lanka, 1999. Available: [http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/Pnac1762.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnac1762.pdf).
- [3] A. Y. Hoekstra and M. M. Mekonnen, "The Water Footprint of Humanity," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, February 2012. Available: <http://www.pnas.org/content/early/2012/02/06/1109936109.full.pdf+html>.
- [4] J. Landsfeld and M. Cook, "Improved Water Resource Management Using an Acoustic Pulsed Doppler Sensor in a Shallow Open Channel," presented at the 2012 Land Grant and Sea Grant National Water Conference, Portland, OR, May 2012. Available: [http://www.usawaterquality.org/conferences/2012/Concurrent\\_pdf/Landsfeld\\_R2.pdf](http://www.usawaterquality.org/conferences/2012/Concurrent_pdf/Landsfeld_R2.pdf).
- [5] M. Gugerty, R. Jenkins, and D. J. Dolezilek, "Case Study Comparison of Serial and Ethernet Digital Communications Technologies for Transfer of Relay Quantities," proceedings of the 33rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, October 2006.
- [6] DNP Users Group, "Benefits of DNP3," 2012. Available: <http://www.dnp.org/Pages/AboutBenefits.aspx>.
- [7] United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, "Water Measurement Procedures Irrigation Operators' Workshop – 1967," Report No. HYD-577, October 1967. Available: [http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/pubs/HYD/HYD-577.pdf](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/HYD/HYD-577.pdf).
- [8] C. P. Kuriakose, *Circuit Theory: Continuous and Discrete Time Systems, Elements of Network Synthesis*. Prentice-Hall of India, New Delhi, India, 2005.

#### XIV. BIOGRAFIAS

**David Dolezilek** recebeu seu BSEE da Montana State University e é o diretor de tecnologia de pesquisa e desenvolvimento na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Ele tem experiência em proteção, automação e integração de sistemas de potência, bem como em sistemas de comunicação, controle, SCADA e EMS. É autor de diversos artigos técnicos e continua a efetuar pesquisas em tecnologias inovadoras de interesse para nossa indústria. David é um inventor patenteado e participa de diversos grupos de trabalho e comitês técnicos. Ele é membro do IEEE, da IEEE Reliability Society, grupos de trabalho do CIGRE, e de dois comitês técnicos da International Electrotechnical Commission (IEC) criados para abordar a segurança e padronização global de sistemas e redes de comunicação de subestações.

**Amandeep Kalra** é um engenheiro de automação da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) em Pullman, Washington. Ele tem mais de três anos de experiência no desenvolvimento e marketing de soluções no nível do sistema para a indústria de água e águas residuais ("wastewater"), incluindo a automação da estação de bombas, esquemas de automação do canal e sistemas de comunicação. Amandeep trabalhou como consultor em diversas áreas técnicas dos distritos de irrigação ao longo da Califórnia e obteve sua certificação EIT antes de ingressar na SEL. Ele tem um diploma em engenharia de instrumentação e controle do National Institute of Technology, Índia, e um grau máster em engenharia elétrica da California State University, Northridge.