



**XXIII SNPTEE  
SEMÍNÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/03  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH**

**SISTEMA DE CONTROLE CONJUNTO COM DESPACHO ÓTIMO DE CARGA**

**Bruno Burigo Brandl (\*)  
REIVAX**

**Leonardo Augusto Weiss  
REIVAX**

**David Oliver Tipián Calixtro  
EDEGEL**

**RESUMO**

Este trabalho apresentará o desenvolvimento e os resultados alcançados no comissionamento de um sistema de controle conjunto pioneiro e inovador. Tal sistema foi desenvolvido e comissionado em 2013, em uma importante hidroelétrica peruana.

O sistema prevê a distribuição de carga considerando o rendimento de cada unidade geradora da usina, buscando otimizar a relação Geração (MW) versus Consumo Hidráulico (m<sup>3</sup>/s) e compensar variações de frequência do sistema elétrico.

Esse sistema proporciona rápida recuperação do sistema elétrico frente às faltas e maximiza o retorno financeiro ao gerador, por possuir controle secundário de frequência e atuar no ponto de melhor rendimento das unidades.

**PALAVRAS-CHAVE**

Controle conjunto, Despacho ótimo, Otimização de rendimento, Controle secundário de frequência, Regulador de velocidade.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O sistema elétrico interconectado peruano é operado por um agente independente, denominado COES (Comitê de Operação Econômica do Sistema). A regulação da frequência do sistema está entre as principais dificuldades encontradas pela operação do COES. Por esse motivo o COES instaurou uma regulamentação (procedimentos de rede PR-21 e PR-22) (1) na qual obriga, entre outras coisas, cada agente gerador a trabalhar com uma potência ativa de reserva, que deve ser utilizada para corrigir os desvios de frequência do sistema. Tal potência ativa de reserva é também conhecida como reserva girante.

Baseado nessa regulamentação, a EDEGEL – *Empresa de Generación Eléctrica de Lima S.A.A (ENEL Group)*, que é um dos agentes geradores peruanos, procurou no mercado um fornecedor de sistemas de controle de geração capaz de atender aos requerimentos do COES. Além disso, de posse de um estudo de rendimento das máquinas da usina de Huinco, a EDEGEL solicitou que esses dados fossem incorporados ao sistema de controle para que as máquinas trabalhassem no melhor ponto de operação para cada referência global da usina.

A REIVAX – empresa brasileira fornecedora de equipamentos para controle e automação da geração – aceitou o desafio, desenvolveu e implantou um sistema inovador de Controle Conjunto com Despacho Ótimo de Carga, objeto deste Informe Técnico.

(\*) Rodovia José Carlos Daux, n° 600 – Tecnópolis – CEP 88.030-904, Florianópolis, SC – Brasil  
Tel: (+55 48) 3027-3700 – Fax: (+55 48) 3027-3735 – Email: bbr@reivax.com.br

## 2.0 - DESCRIÇÃO DA PLANTA

O sistema de controle conjunto com despacho ótimo de carga foi colocado em operação na Central Hidroelétrica Huinco, no Peru, administrada pela EDEGEL.

Essa usina possui quatro máquinas Pelton, sendo duas turbinas por gerador, e uma capacidade instalada de aproximadamente 250MW, que representa 3,25% da capacidade instalada no Peru (7,7GW) (2).

Huinco está localizada a 63,5 km de Lima (centro de carga peruano) e é uma das usinas reguladoras de frequência do país. A TABELA 1 mostra as principais características da Central Huinco (3).

**TABELA 1 - Características da Central Huinco**

<b>Potência instalada</b>	258,4 MW
<b>Potência efetiva</b>	247,3 MW
<b>Geração anual (média)</b>	866 GWh
<b>Vazão da central</b>	25 m <sup>3</sup> /s
<b>Queda bruta</b>	1293 m
<b>Tipo da turbina</b>	Pelton dupla de eixo horizontal
<b>Número de unidades</b>	4
<b>Início das operações</b>	1964

## 3.0 - OS PROCEDIMENTOS DE REDE PR-21 E PR-22

O procedimento de rede PR-21 estabelece uma série de obrigações para o COES e para os agentes geradores, as quais estão relacionadas à reserva girante para regulação primária de frequência. A regulação primária de frequência diz respeito essencialmente às malhas dos reguladores de velocidade, que devem possuir malha de potência/frequência e estatismo permanente.

Esse procedimento obriga, entre outras questões, que um agente gerador que possua mais de 10 MW de potência instalada tenha reguladores de velocidade que atendam a regulação primária de frequência e que possuam resposta rápida o suficiente para aportar sua reserva girante em até 30 segundos após uma ocorrência de desvio de frequência da rede.

O procedimento de rede PR-22 está relacionado à reserva girante para regulação secundária de frequência. A regulação secundária de frequência tem o mesmo objetivo da regulação de frequência primária, mas permite, entre outras questões, que um agente gerador utilize um controlador automático de geração para atendê-la e que tais sistemas possuam resposta rápida o suficiente para aportar sua reserva girante em até 10 minutos após uma ocorrência de desvio de frequência da rede.

## 4.0 - DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E SOLUÇÃO ADOTADA

O uso de sistemas de controle conjunto de potência ativa (ou *JLC, Joint Load Control*) e reativa (ou *JVC, Joint Voltage Control*) é bastante comum em usinas com mais de uma unidade geradora. Esses sistemas permitem ao operador controlar todas as máquinas com uma única referência global para a usina.

Muitos dos sistemas convencionais apenas realizam a distribuição da referência global pelo número de unidades, selecionando referências individuais para cada máquina diretamente. Alguns sistemas convencionais nem mesmo consideram uma malha de controle para realizar a distribuição de carga, simplesmente dividem a referência total pelo número de unidades.

Já o sistema de controle conjunto desenvolvido para Huinco é baseado em um controlador em malha fechada (malha secundária) externo à malha dos reguladores de velocidade (malha primária) de cada unidade geradora. A atuação do sistema de controle se dá através de pulsos sobre a referência do regulador de velocidade. Isso flexibiliza a integração do controle conjunto ao regulador de velocidade, independente da tecnologia, marca e modelo.

Os principais requisitos para o sistema de controle conjunto desenvolvido foram, de maneira geral, os seguintes:

- O sistema deve atender ao PR-22, realizando controle secundário de frequência de forma a dar suporte rápido ao restabelecimento da rede (subfrequências e sobrefrequências), apoiando as malhas primárias dos reguladores de velocidade (estatismo), atuando sobre as referências de potência ativa das unidades;
- O sistema deve distribuir a potência total da usina entre as unidades, considerando que para cada grupo de máquinas em operação existe uma curva que determina o melhor rendimento (MW/m<sup>3</sup>/s) para cada máquina compondo o ponto de operação global.

A solução foi concebida sobre um hardware próprio, utilizando um controlador lógico programável da REIVAX (CPX 3.0), que se integra pela rede de comunicação com os reguladores de velocidade e por contatos secos com os sistemas de excitação (o controle conjunto de tensão também foi desenvolvido de forma integrada, mas não será detalhado nesse Informe Técnico). Nesse controlador são executadas as malhas de controle externas às unidades e gerados os pulsos que atuam sobre as referências de potência ativa dos reguladores de velocidade.

Para a interface homem-máquina, foi utilizado um sistema supervisorio baseado em Elipse E3 (4). Essa interface foi instalada na sala de controle da usina e permite a operação e parametrização do equipamento. A FIGURA 1 mostra a arquitetura do sistema.

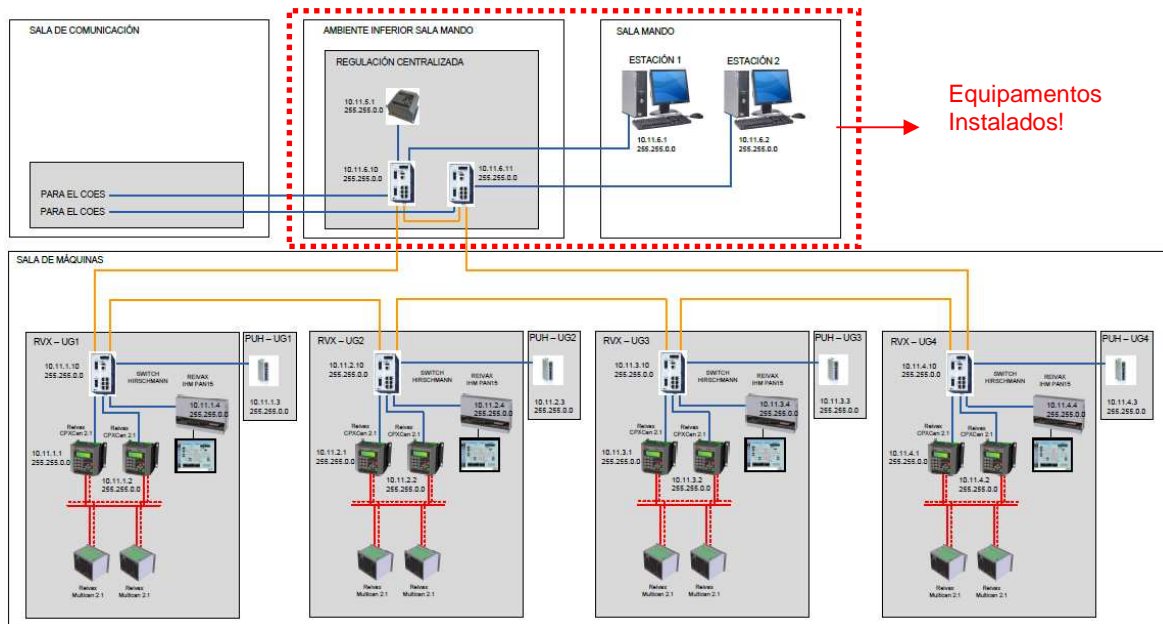


FIGURA 1 - Arquitetura do sistema

O software do controlador foi modelado para atender aos requisitos do projeto. Para o controle secundário de frequência, foi acrescentada à malha de controle de potência da usina uma parcela proporcional ao desvio de frequência observado.

Assim, mesmo que o erro na malha de potência seja nulo, uma parcela proporcional ao desvio de frequência atua sobre as referências de potência das unidades, caso exista erro de frequência. Esse é o mesmo conceito de estatismo utilizado nas malhas tradicionais de regulação de velocidade, entretanto, por ser uma malha externa e atuar sobre a referência de potência ativa individual das unidades, possui uma atuação com dinâmica mais lenta.

Outra característica utilizada para garantir que o controlador apoiará o sistema, caso existam desvios de frequência, é a inserção da parcela de reserva girante. As reservas girantes – positiva e negativa – são parâmetros inseridos pelo operador na tela e utilizados como dado de entrada do controlador.

Uma reserva girante positiva implica em adaptar o espaço de operação da usina, diminuindo sua potência total máxima, para que em uma eventual subfrequência do sistema elétrico, os geradores consigam aportar tal reserva de potência ativa, a fim de levar a frequência da rede a seu patamar nominal.

Já uma reserva girante negativa implica em adaptar o espaço de operação da usina, aumentando sua potência total mínima, para que em uma eventual sobrefrequência do sistema elétrico, os geradores consigam reduzir tal reserva de potência ativa a fim de levar a frequência da rede a seu patamar nominal.

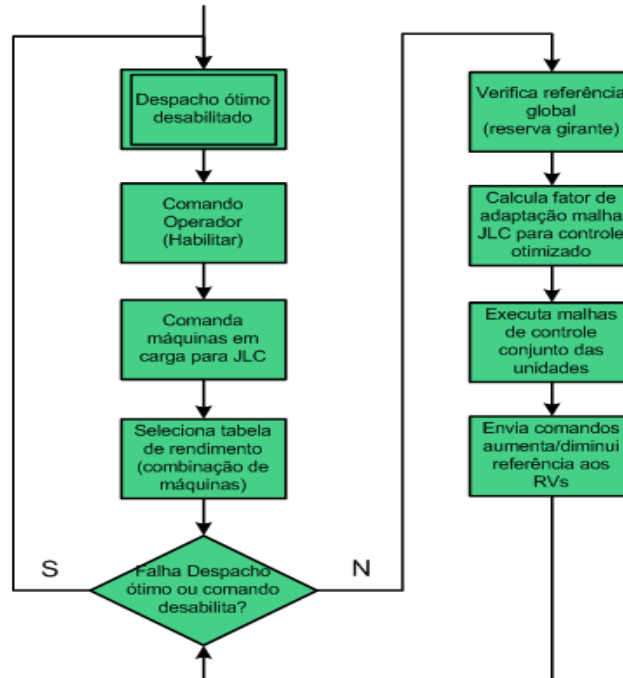
Para a distribuição de carga considerando o melhor rendimento, foi entregue pelo cliente um estudo que mostra a melhor distribuição de cargas entre máquinas para qualquer referência global da usina. A TABELA 2 mostra um exemplo do ponto otimizado de operação para 4 máquinas, dada uma referência global.

TABELA 2 - Exemplo de distribuição ótima de potência ativa (4 unidades)

Referência global (MW)	Potência otimizada UG1 (MW)	Potência otimizada UG2 (MW)	Potência otimizada UG3 (MW)	Potência otimizada UG4 (MW)
240,0	62,8	64,5	64,5	48,3
245,0	64,5	64,5	64,5	51,5
250,0	64,5	64,5	64,5	56,5

De posse das tabelas de rendimento para cada conjunto de unidades geradoras, esses dados foram inseridos no controlador e interpolados de maneira que, para cada ponto de operação da usina e combinação de unidades geradoras em operação, exista um valor ótimo de potência ativa para cada unidade. O resultado dessa interpolação é utilizado para calcular um fator adaptativo na malha de controle. Esse fator modifica a referência de potência individual de maneira que a potência ativa respeite a tabela de rendimento.

Para realizar a tarefa de distribuição da carga, considerando o rendimento de cada unidade geradora, foi desenvolvida uma rotina lógica no software. Essa rotina é apresentada na FIGURA 2.



**FIGURA 2 - Fluxograma lógico do sistema de despacho ótimo**

## 5.0 - INSTALAÇÃO, INTERFACES E ADEQUAÇÕES REALIZADAS

Para integrar o novo sistema aos reguladores de velocidade existentes (Reguladores digitais, marca REIVAX, Modelo RVX POWER), foi utilizada uma rede de computadores Ethernet, topologia em anel. Para isso, foi necessária a substituição dos switches existentes por switches gerenciáveis que trabalhassem nessa arquitetura.

O protocolo de comunicação utilizado foi o Modbus TCP. Através do protocolo de comunicação, o controlador conjunto recebe de cada um dos reguladores de velocidade as variáveis necessárias para executar sua lógica de controle, como medição de potência ativa, medição de frequência, permissíveis de controle conjunto, etc. Além disso, pela mesma rede são enviados os comandos para aumentar/diminuir a referência de cada máquina.

Um controle conjunto de tensão/reactivo também foi desenvolvido. Sua interface com os reguladores de tensão existentes (Reguladores analógicos, marca Brown Boveri, modelo KC) foi realizada através de contatos secos. Para isso, foram utilizadas saídas físicas do controlador centralizado e cabeamento rígido entre o painel do controlador centralizado e cada um dos reguladores de tensão.

Os equipamentos foram instalados e comissionados em 10 dias. Na FIGURA 3 são apresentadas fotos da instalação do painel de controle.

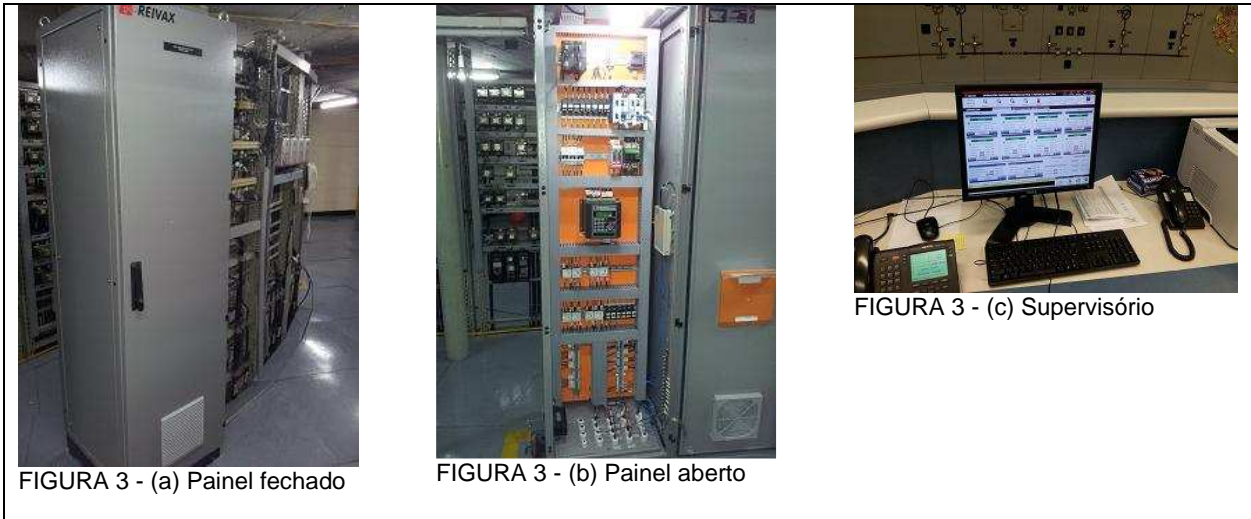


FIGURA 3 - (a) Painel fechado

FIGURA 3 - (b) Painel aberto

FIGURA 3 - (c) Supervisório

FIGURA 3 - Fotos da instalação

## 6.0 - ENSAIOS DE CAMPO E RESULTADOS ALCANÇADOS

Os ensaios de campo foram realizados a fim de validar o atendimento aos requisitos do projeto. O sistema apresentou resultados satisfatórios e os resultados serão detalhados conforme os dois principais requisitos: cumprimento da PR-22 e Otimização do rendimento.

### 6.1 Cumprimento do PR-22

O sistema atendeu aos requisitos do procedimento de rede PR-22, melhorando a regulação de frequência do sistema elétrico peruano. Para avaliar o atendimento, foram monitoradas as variáveis: frequência, potência ativa total e referência de potência ativa total. A FIGURA 4 apresenta um gráfico com o momento de uma variação brusca da carga na rede e sua consequente perturbação na frequência.

A análise do gráfico permite observar que, para uma referência constante de potência ativa total (200 MW), o sistema atua sobre as referências das máquinas ante um desvio negativo de frequência, aumentando a potência total (instante 480s). Esse desvio foi gerado pela entrada repentina de uma grande carga, que provocou o afundamento da frequência da rede. Nessa situação, a reserva girante positiva e negativa era igual a 40MW. O tempo de resposta foi de aproximadamente 1 minuto.

Cabe ressaltar que nos instantes prévios à entrada dessa carga, a frequência da rede estava acima da nominal e, portanto, o controlador estava fazendo com que a potência total da usina fosse menor que a referência de 200MW. Esse comportamento evidencia o correto funcionamento ante um desvio positivo de frequência também, pois o controlador atuou diminuindo a potência total da usina.

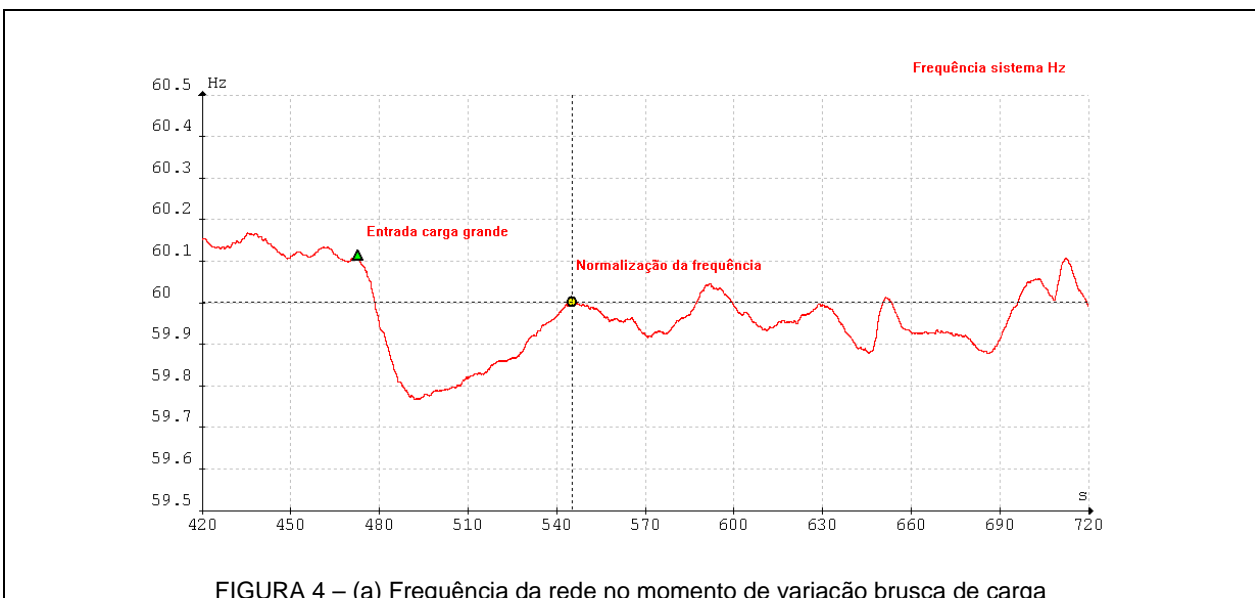
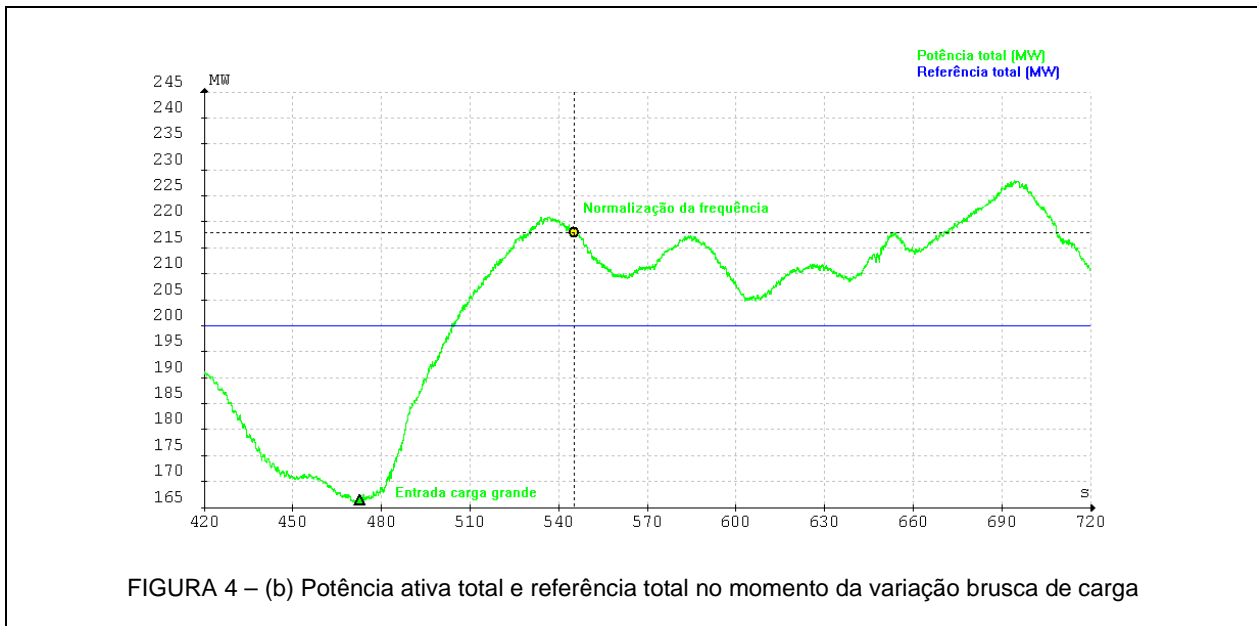


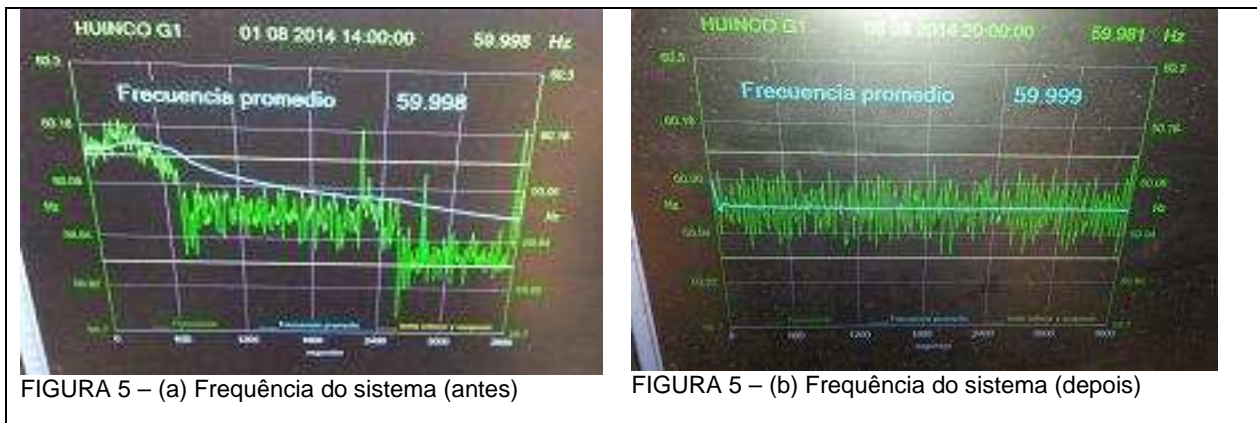
FIGURA 4 – (a) Frequência da rede no momento de variação brusca de carga



**FIGURA 4 – Análise do atendimento ao PR-22**

A responsabilidade pela normalização da frequência é solidária entre todos os agentes geradores do sistema e não significa que foi apenas a usina de Huinco, através de seu controlador secundário, que normalizou o sistema elétrico. Entretanto, o gráfico corrobora o correto funcionamento do equipamento, pois mostra sua atuação no sentido de apoiar a normalização da frequência.

A FIGURA 5 mostra a comparação da frequência do sistema peruano, medida na saída de Huinco por um equipamento de terceiros, antes e depois da colocação em operação do sistema de controle conjunto desenvolvido.



**FIGURA 5 - Frequência da rede: comparação antes e depois do sistema desenvolvido entrar em operação**

## 6.2 Otimização do Rendimento

O sistema atendeu ao requisito de distribuição de carga conforme a tabela de rendimento. Garantiu a otimização do ponto de operação global da usina, aumentando a relação entre a produção energética (MW) e o consumo hidráulico ( $m^3/s$ ). Foram ensaiados os diferentes conjuntos de máquinas e diferentes pontos de operação, todos com resultados satisfatórios.

Para avaliar o desempenho, foram realizados registros gráficos e em vídeo do comportamento do sistema ao longo do tempo. Nesses gráficos, são encontrados pontos onde os erros de frequência e potência ativa são nulos e, nesses pontos, checadadas as potências de cada máquina individualmente. Essas potências individuais são comparadas com a tabela de rendimentos para checar a correta atuação do controlador.

A FIGURA 6 mostra um ponto com erro de frequência e potência próximos a 0 e a TABELA 3 mostra sua comparação com a divisão ótima já apresentada na TABELA 2. A referência de potência ativa para a usina, na análise desse ponto específico, é de 240 MW.



TABELA 3 - Comparação entre valor ótimo da tabela de rendimento e valor ótimo conforme controlador

Referência total = 240 MW	Potência otimizada (MW) TABELA 2	Potência real (MW) FIGURA 6	Erro (%) entre potência ótima e potência real
Unidade 1	62,80	62,88	0,13
Unidade 2	64,50	64,10	0,62
Unidade 3	64,50	64,21	0,45
Unidade 4	48,30	48,75	0,93

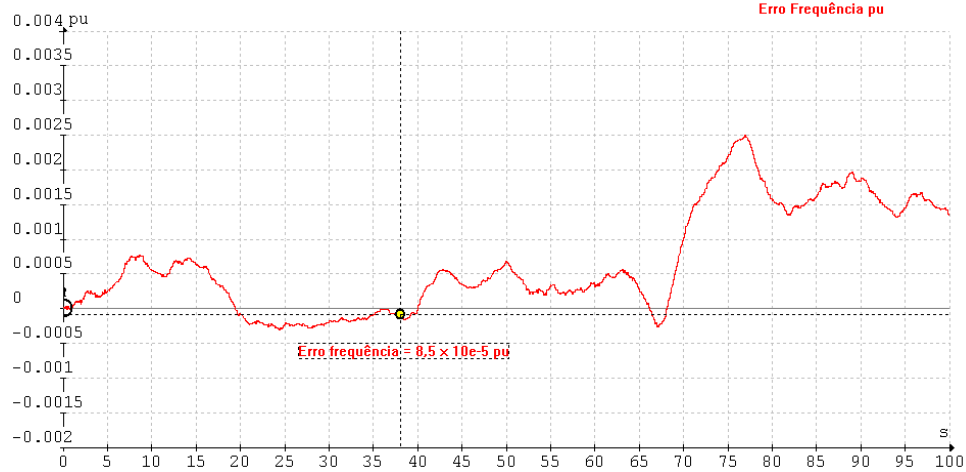


FIGURA 6 – (a) Erro de frequência próximo de zero com despacho ótimo habilitado

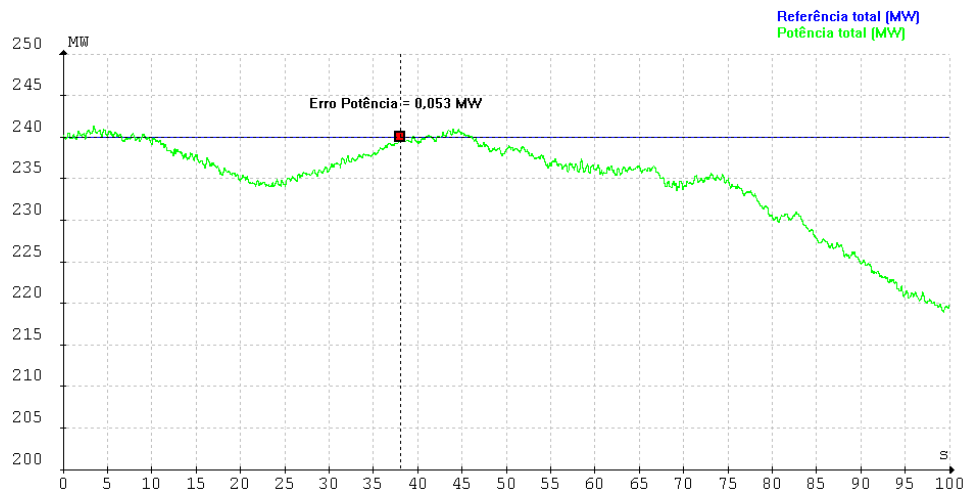
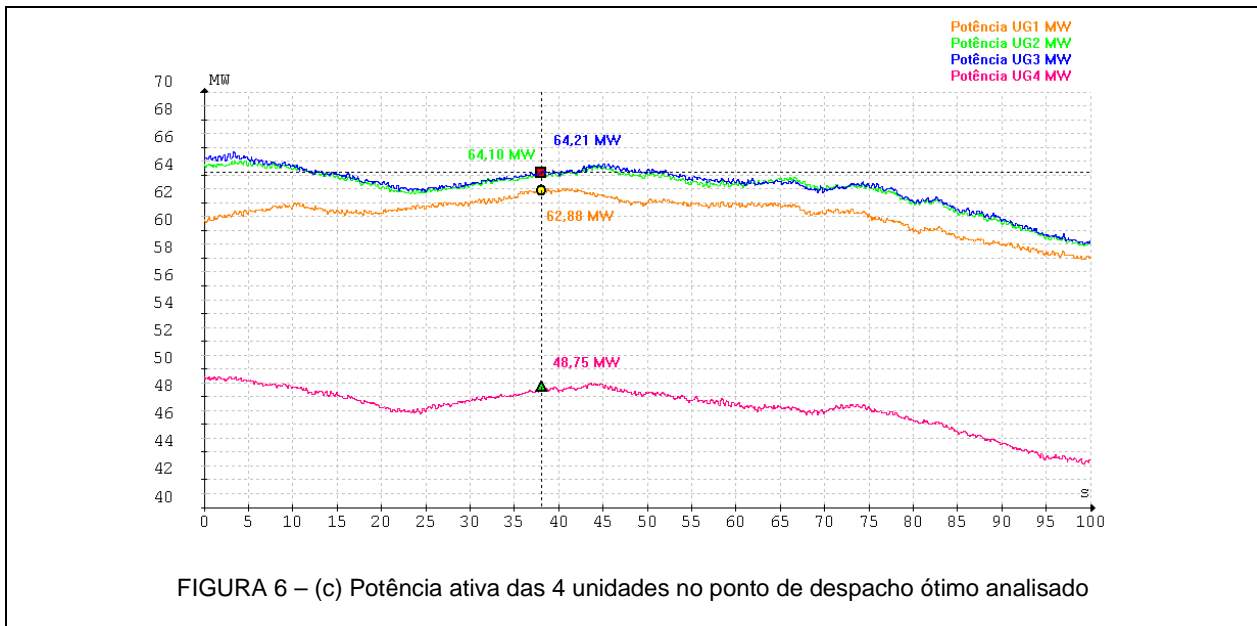


FIGURA 6 – (b) Erro de potência ativa próximo de zero com despacho ótimo habilitado



**FIGURA 6 - Análise do atendimento à tabela de rendimento ótimo**

## 7.0 - CONCLUSÃO

A colocação em operação do sistema de controle conjunto com despacho ótimo de carga proporcionou ganhos a todos os atores envolvidos.

Para o agente gerador, a sua utilização representa produzir mais consumindo menos. Além disso, a PR-22 prevê uma remuneração maior pelo MW gerado (ou deixado de gerar) para aquele agente que cumprir com seus requisitos. A soma de todos esses benefícios se traduz em maior rentabilidade da geração.

Caso a usina tenha um índice de operação de cerca de 70% de sua capacidade instalada, o que corresponderia a gerar 180MW, a economia de água é de aproximadamente 0,1m<sup>3</sup>/s, aproximadamente 0,6% de economia de água. Ao longo de um dia, isso equivale a economizar 8640 m<sup>3</sup> de água, que podem ser armazenados e usados para aumentar a geração. Caso essa geração excedente fosse mantida constante ao longo de um mês, com o valor pago pelo MWh igual a 100 dólares, isso representaria um incremento de receita mensal de 77.760,00 dólares.

Para o Operador do Sistema, a colocação em operação desse sistema representou uma maior estabilidade da frequência do sistema elétrico e um melhor suporte às faltas, uma vez que um sistema automático de geração toma ações no sentido de apoiar o restabelecimento da normalidade com tempos de resposta mais satisfatórios que as ações manuais de operação. Esse tipo de atuação pode ser determinante para evitar efeitos em cascata por conta de faltas no sistema elétrico, pois o sistema trabalha rapidamente no reequilíbrio carga-geração.

O sistema desenvolvido atendeu aos requisitos do projeto, apresentando resultados satisfatórios. A solução foi concebida para ser modular e escalável, o que a torna facilmente adaptável em outras usinas, independente do número de máquinas e do sistema de regulação existente. O uso desse sistema aponta para uma revolução no sistema elétrico peruano, pois atua diretamente na raiz do problema com um controle automático da geração baseado na frequência. Igual caminho deve ser adotado por outros países que enfrentam problemas semelhantes. Independente do país e da estabilidade da frequência da rede, esse sistema tem relevância por apresentar ganhos de rentabilidade altíssimos, devido à utilização das unidades geradoras no seu melhor ponto de rendimento.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COMITÊ DE OPERAÇÃO ECONÔMICA DO SISTEMA (COES). Procedimento de rede PR-21 e PR-22. Disponível em <http://www.coes.org.pe/wcoes/coes/organizacion/marco/procedimientos.aspx>. Acesso em 06/03/2015.
- (2) COMITÊ DE OPERAÇÃO ECONÔMICA DO SISTEMA (COES). Estudo de verificação da margem de reserva firme do sistema interconectado nacional SEIN. Disponível em <http://www.coes.org.pe/wcoes/coes/infoperativa/estudios/vmfo/default.aspx>. Acesso em 06/03/2015.
- (3) EDEGEL. Informações das centrais de geração hidráulica. Disponível em [http://www.edegel.com/m\\_huinco.htm](http://www.edegel.com/m_huinco.htm). Acesso em 06/03/2015.
- (4) ELIPSE SOFTWARE. Manual do usuário do Elipse E3. Disponível em [http://www.elipse.com.br/port/download\\_e3.aspx](http://www.elipse.com.br/port/download_e3.aspx). Acesso em 06/03/2015.



## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Autor de contato:



Nome: Bruno Burigo Brandl

Local/Ano nascimento: Florianópolis/SC, 1986

Formação: Engenheiro de Controle e Automação

Instituição de ensino: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC.

Experiência profissional: Atua desde 2008 na Reivax SA como engenheiro projetista de software, trabalhando com o desenvolvimento de sistemas de controle e automação para geração de energia elétrica, com foco em sistemas SCADA, arquiteturas de rede, comunicação industrial, projeto de lógicas e malhas de controle, automação discreta, testes e comissionamento.

Autor 2:



Nome: Leonardo Augusto Weiss

Local/Ano nascimento: Lages/SC, 1980

Formação: Engenheiro de Controle e Automação

Instituição de ensino: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC.

Experiência profissional: Desde 2005 atua na Reivax SA como engenheiro projetista de software. Em 2007 passou a Supervisor da Equipe de Projeto de Software. Trabalha com o desenvolvimento de sistemas de controle e automação para geração de energia elétrica, com foco em sistemas SCADA, arquiteturas de rede, comunicação industrial, projeto de lógicas e malhas de controle, automação discreta, testes e comissionamento, Planejamento e supervisão de equipe.

Autor 3:



Nome: David Oliver Tipián Calixtro

Local/Ano nascimento: Lima/Lima, 1974

Formação: Engenheiro Eletricista

Instituição de ensino: Universidad Nacional de Ingeniería, Lima/Peru.

Experiência profissional: Desde 1999, Engenheiro Junior de área técnica, Engenheiro de Manutenção, Inspetor de Projetos, desde 2008 Especialista Sênior da área Técnica.