

LEONARDO ROCHA TEIXEIRA  
NOHEMY CÁSSIA PEIXOTO DE PAULA

**ESTUDO DE CASO: MELHORIA DO SISTEMA DE  
CONTROLE DE GERAÇÃO NA CGH PONTE QUEIMADA,  
EM OPERAÇÃO À FIO D'ÁGUA**

BACHARELADO  
EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

DOCTUM-MG

2015

LEONARDO ROCHA TEIXEIRA  
NOHEMY CÁSSIA PEIXOTO DE PAULA

**ESTUDO DE CASO: MELHORIA DO SISTEMA DE  
CONTROLE DE GERAÇÃO NA CGH PONTE QUEIMADA,  
EM OPERAÇÃO À FIO D'ÁGUA**

Monografia apresentada à banca examinadora do Instituto Tecnológico de Caratinga ITC/ Doctum, como exigência parcial de obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica, sob a orientação do professor Joildo Fernandes Costa Júnior.

DOCTUM-CARATINGA

2015

Agradeço em 1º lugar ao meu Senhor e salvador Jesus Cristo, o qual pela sua bondade e misericórdia me sustentou desde o início de minha vida e me tomou pela mão todas as vezes que pensei em desistir.

Leonardo Rocha Teixeira

Agradeço primeiramente a Deus, que me guiou ao longo destes anos e é o pilar de toda esta caminhada. Aos amigos e meus pais, Jucelio e Lucimar, que sempre me incentivaram e toda a minha família, que nunca me deixou desanimar diante de tantos obstáculos.

Nohemy Cássia Peixoto de Paula

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas  
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica  
COR- Centro de Operação Remoto  
KW - *Quilo Watt*  
MM- Milímetros  
MW - Mega watt  
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico  
PCH - Pequena central hidrelétrica  
PLC - programmable logic controller  
RV - Regulador de velocidade  
SDSC - Sistema digital de supervisão e controle  
SIN - Sistema interligado nacional  
UG - Unidade geradora  
UHE - Usina hidrelétrica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Barragem de Concreto CGH Bom Jesus .....	17
Figura 2- Extravasores da UHE Aimorés .....	18
Figura 3- Comporta do extravasor- UHE Aimorés.....	19
Figura 4- Tomada d'água- UHE Retiro Baixo.....	19
Figura 5- Conduto Forçado.....	20
Figura 6- Chaminé de Equilíbrio .....	20
Figura 7- Casa de Força UHE Quilleco-Chile .....	21
Figura 8- Turbina Francis- PCH Cajú.....	22
Figura 9- Turbina Kaplan.....	22
Figura 10- Turbina Pelton.....	23
Figura 11-Variação da grandeza física do sensor analógico.....	28
Figura 12- Exemplo posição de objeto em encoder incremental .....	29
Figura 13- Sensor de nível ultrassônico .....	32
Figura 14-PLC- Diagrama de blocos .....	33
Figura 15- Casa de Força CGH Ponte Queimada .....	38
Figura 16- Linha 1- Programação Controle de Geração .....	43
Figura 17- Linha 2- Programação Controle de Geração .....	44
Figura 18- Linha 3- Programação Controle de Geração .....	44
Figura 19- Linha 4- Programação Controle de Geração .....	44
Figura 20- Linha 5- Programação Controle de Geração .....	44
Figura 21- Linha 6- Programação Controle de Geração .....	45
Figura 22- Linha 7- Programação Controle de Geração .....	45
Figura 23- Linha 8- Programação Controle de Geração .....	45
Figura 24- Linha 9- Programação Controle de Geração .....	45
Figura 25- Uploading no PLC .....	47
Figura 26- Erro- RST resetando o temporizador T200 que não faz parte do processo .....	48
Figura 27- Erro- DoubleCoil: Duas memórias iguais .....	48
Figura 28- Erro- Modelo de PLC da programação ilhada diferente do utilizado pela usina em estudo.....	49
Figura 29- Aviso de processo devidamente finalizado .....	49

Figura 30– Painel Botoeira para habilitar ou desabilitar função de comando automático foi instalada .....	52
Figura 31– Painel antes de instalação do LED de falha no controle .....	52
Figura 32- Configuração do alarme .....	53
Figura 33– Alarme Controle de geração Nível baixo .....	53
Figura 34– Falha no controle automático de geração já configurado.....	54
Figura 35– Tela do ADP para criação da tela de alarme .....	54

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Saídas por potência reversa na unidade geradora 1 .....	41
Gráfico 2- Saídas da unidade geradora 2 por potência reversa .....	42
Gráfico 3- Motivos de saída das unidades geradoras/ julho a outubro .....	42
Gráfico 4- Motivos de saída das unidades geradoras/ julho a outubro .....	51
Gráfico 5- Junho .....	55
Gráfico 6- Julho .....	55
Gráfico 7-Agosto .....	55
Gráfico 8- Setembro.....	56
Gráfico 9- 16 de novembro de 2015 .....	56
Gráfico 10- 17 de novembro de 2015 .....	56
Gráfico 11-18 de novembro de 2015 .....	57
Gráfico 12- 19 de novembro de 2015 .....	57

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Linguagem em ladder, instruções básicas .....	35
Tabela 2– Saída por potência reversa na unidade geradora 1.....	39
Tabela 3– Saída por potência da unidade geradora 2 .....	39

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>CONSIDERAÇÕES CONCEITUAIS</b> .....	<b>13</b>
<b>1-REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>15</b>
1.1 GERAÇÃO HIDRELÉTRICA.....	15
1.2 ESTRUTURA DO CIRCUITO DE ADUÇÃO .....	16
1.3 SISTEMA DIGITAL DE SUPERVISÃO E CONTROLE .....	24
<b>2-MONITORAMENTO E CONTROLE DE PROCESSOS</b> .....	<b>26</b>
2.1 SINAS E MEDIDAS .....	26
2.2 SENSORES .....	27
2.2.1 Sensor de Nível .....	30
2.2.1 Sensor Ultrassônico .....	30
2.3 PLC.....	32
<b>3-ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>37</b>
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA .....	37
3.2 PARADAS NÃO PROGRAMADAS .....	38
3.3 PROJETO .....	42
3.3.1 Testes realizados .....	47
3.4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	55
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>59</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>62</b>

## **RESUMO**

Esta monografia contempla o projeto de melhoria do sistema de controle de geração desenvolvido na Central Geradora Hidrelétrica (CGH) Ponte Queimada, localizada no distrito de São José do Porto, em Bom Jesus do Galho; em operação a fio d'água. Para isso, variáveis de monitoramento do sistema foram trabalhadas dentro da lógica de programação do PLC. Também foram utilizados, lógica de programação em ladder, sensores de medição, pressão, velocidade e protocolos de comunicação. A finalidade é aprimorar o controle da geração, manipulando entrada/saída, atuando sobre certos parâmetros, otimizando o processo de automação da usina. Assim, espera-se eficiência, reduzindo-se o desperdício devido à falha no monitoramento do processo que, atualmente, ocorre de maneira manual.

## **PALAVRAS CHAVE**

Controle de geração, PLC, Eficiência Energética

## **ABSTRACT**

This monograph includes the improvement project of a generation control system developed in Central Hydroelectric Generation (CGH) Burnt Bridge, located in the district of San Jose del Porto in Bom Jesus twig ; operating a trickle. Therefore, monitoring of system variables were worked into the PLC program logic. They were also used in ladder logic programming, measurement sensors, pressure, speed and communication protocols. The purpose is to improve the generation of control by manipulating input / output, acting on certain parameters, optimizing the plant's automation process. Thus, we expect efficiency, reducing waste due to failure in the monitoring process that currently takes place in manual way.

## **KEYWORDS**

Generation control, PLC, Efficiency

## INTRODUÇÃO

Para a Engenharia Elétrica, o estudo da geração de energia elétrica é necessário para acompanhar as dificuldades do setor que é influenciado pelo clima desfavorável, fatores econômicos ou intervenção política.

O Brasil tem a energia hidrelétrica como principal fonte de geração e é necessário aproveitar esses recursos de modo mais vantajoso. A escolha deste tema partiu da necessidade de ilustrar a situação atual, com a matriz energética defasada e ao mesmo tempo com tantos recursos hídricos sem serem explorados devidamente, em virtude das inviabilidades técnicas.

O sistema de regulação de velocidade e tensão é o corpo de toda a usina e, logo, a automação é o cérebro da usina, uma vez que controla todos os processos envolvidos, desde o simples Setpoint de potência até toda a proteção. Toda essa instalação ficaria subaproveitada se não contasse com um controle eficiente da geração, que é finalidade de toda a usina. Esse sistema tem de ter todos os processos trabalhando conjuntamente para uma melhor eficiência e aproveitamento da planta.

Muitas vezes há variáveis disponíveis e que, atualmente, estão em desuso para o fim de um melhor controle de geração. Esse ponto muitas vezes passa despercebido, já que há uma sala de controle e nem sempre pensamos em todos os processos automatizados.

Ou seja, há toda uma estrutura cara e complexa, com todas as variáveis ao dispor do sistema e muitas vezes utilizam-se desse controle de maneira arcaica, de forma manual, sendo verificado por um operador.

Com esse controle manual, todo o sistema de automação projetado fica, por analogia, como se fosse uma Ferrari em uma estrada de terra. A eficiência fica limitada a ação de vários operadores, que manualmente aumentam a geração, o que implica em uma série de problemas de ordem técnica, tais como, perdas de geração devido à falta de verificação do nível por parte do operador.

Estas perdas ainda estão condicionadas à falta de comunicação com o Centro de Operação Remoto (COR), uma vez que a usina perde a comunicação via internet. Isso implica em uma perda do controle e, caso venha a chover, a água é perdida, gerando desperdício na geração.

Também temos perdas devido à falta de uma tabela de despacho automático a se seguir, à queda de pressão no conduto, e devido ao controle das duas unidades geradoras

(UG's) de maneira paralela, sendo que esse controle de geração é feito pelo operador que, a priori, aumenta/diminui, parte e para UG's de acordo com seu conhecimento empírico.

Este trabalho visa aprimorar o sistema de controle da usina, para que, de maneira totalmente ilhada de um COR, possa efetuar o controle dessa geração e a partida e parada de máquinas, de acordo a tabela de despacho de carga, propiciando um melhor rendimento. É possível identificar alguns ganhos, dentre eles, maior confiabilidade, redução de erro humano, facilidade operacional e agilidade na tomada de decisões.

Para isso, utilizou-se de uma metodologia de pesquisa, contemplando revisão bibliográfica, selecionando os conceitos básicos para o seu desenvolvimento, dando um embasamento para a parte prática.

Os objetivos operacionais se cumprem através de visita a CGH Ponte Queimada, de modo a colher dados e informações necessárias, realizar testes e implantar o sistema; além de correspondência com possíveis fontes de dados. É importante destacar que durante todo o processo a revisão bibliográfica teve como marco fundamental a proximidade com o marco teórico, para definir bibliografia básica e complementar, tendo como padrão a normatização vigente.

A partir das visitas e observações, foi possível obter uma representação empírica quantitativa do corpo teórico, estruturados sob a seguinte pauta de interesses: técnico, científico e eficiência.

A estrutura do trabalho se divide em três capítulos. O primeiro trata de uma revisão bibliográfica, através da conceituação de hidroeletricidade, a estrutura básica de uma usina hidrelétrica, sua classificação e seus componentes; permitindo um conhecimento básico do funcionamento de uma hidrelétrica.

A ideia que direciona o segundo capítulo terá como tema principal o sistema de controle industrial, sinais, PLC, linguagem de programação e protocolos de comunicação. Também serão abordados os principais equipamentos de medição/conversão fundamentais para esta pesquisa, tais como sensores digitais, analógicos e conversor A/D e D/A.

E por fim, no terceiro capítulo trataremos especificamente sobre o estudo de caso da CGH Ponte Queimada, objetivo principal deste trabalho, onde será exposto o aprimoramento do sistema de controle, gráficos, equações e resultados obtidos. Neste ponto, haverá a confirmação ou não da hipótese levantada.

## CONSIDERAÇÕES CONCEITUAIS

O sistema de controle de geração de energia elétrica diz respeito à área de controle de processos contínuos. Todos os processos envolvidos na construção de uma usina desde a parte civil, como barragem, conduto forçado, parte elétrica, mecânica, eletrônica, automação e controle visam um único fim primordial para o investimento, que é a eficiência na geração de energia elétrica, aproveitando-se a totalidade do local em questão para a geração de energia elétrica.

Este estudo é fundamentado na importância de se buscar meios para aprimorar a qualidade da geração, de modo a gerar menor desperdício. Uma das principais vantagens está em viabilizar um sistema melhor monitorado, convergindo para o conceito de eficiência energética, definido por Viana:

Promover a eficiência energética é utilizar o conhecimento no campo energético de forma aplicada, empregando os conceitos da engenharia, da economia e da administração aos sistemas energéticos. Devido à diversidade e complexidade desses sistemas, é interessante apresentar técnicas e métodos para definir objetivos e ações para melhorar o desempenho energético e reduzir as perdas nos processos de transporte, armazenamento e distribuição de energia.<sup>1</sup>

Deste modo, busca-se o controle de geração, processo facilmente implantado com o auxílio de um PLC, que é dividido fundamentalmente em duas partes importantes: hardware e software. Segundo Silveira e Santos (2013, p. 83)<sup>2</sup> “um PLC é basicamente composto por dois elementos principais: uma CPU (Unidade Central de Processamento) e interfaces para os sinais de entrada e saída”.

A obsolescência do sistema em razão da incapacidade de proceder às novas funcionalidades impacta principalmente na operação. Com a constante necessidade de evolução, novas funcionalidades ganham espaço e, em sua maioria, são necessidades dos operadores.

Em face disso, o marco teórico desta pesquisa é fundamentado pela seguinte citação de Ogata:

---

<sup>1</sup> VIANA, Augusto Nelson Carvalho. et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. 1 ed. Campinas: 2012

<sup>2</sup> SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e controle discreto**. 9 ed. reimpr. São Paulo: Érica, 2013

Como os avanços no controle automático, na teoria e na prática, vêm produzindo meios para otimizar o desempenho dos sistemas dinâmicos, melhorar a produtividade, diminuir o trabalho árduo de várias rotinas de operações manuais repetitivas, entre outros, a maioria dos engenheiros e dos cientistas devem ter agora bons conhecimentos nesta área.<sup>3</sup>

Tal citação ainda é atestada por Francesco Prudente (2010, p.275)<sup>4</sup>, que acredita que “na automação industrial e na indústria de processos, apresentam-se problemas de gestão de grandezas físicas como temperatura, pressão, pesos, fluxos de líquidos e outras variáveis ligadas a fenômenos físicos”.

Este pensamento ainda é compartilhado por Silveira e Santos:

O controle, na escala tecnológica, assume papel primordial e decisivo dentre os modelos e processo existentes, sejam eles simples, modestos, robustos ou de extrema complexidade nos planos das ações (..) A necessidade de controlar processos dá origem às técnicas de controle, que também não se constituem novidades nos tempos modernos.<sup>5</sup>

Por fim, Nise completa a importância do controle na operação de um sistema:

(...) Outro benefício dos sistemas de controle, a capacidade de compensar perturbações. Usualmente, controlamos variáveis como temperatura em sistemas térmicos, posição e velocidade em sistemas mecânicos e tensão, corrente ou frequência em sistemas elétricos. O sistema deve ser capaz de fornecer a saída correta mesmo em presença de perturbações.<sup>6</sup>

Deste modo, o presente trabalho tem a proposta de tratar variáveis de entrada/saída como pressão, velocidade da água, nível de água na barragem e potência instantânea da CGH Ponte Queimada, através de um PLC, levando ao patamar de um sistema de controle automático, evitando o desperdício e a baixa eficiência da usina.

---

<sup>3</sup> OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, 4ed. Rio de Janeiro, RJ, Prentice Hall do Brasil, 2003

<sup>4</sup> FRANCESCO, Prudente. **Automação Industrial – PLC – Programação e Instalação**. Editora Ltc, 2010.

<sup>5</sup> SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e controle discreto**. 9 ed. reimpr. São Paulo: Érica, 2013.

<sup>6</sup> NISE, Norman S.. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002

## CAPÍTULO I- REVISÃO DE LITERATURA

Para entender o funcionamento de uma usina hidrelétrica, se faz necessário falar sobre o principal recurso que favoreceu a sua implantação no Brasil: a abundância das bacias hidrográficas. A água é o recurso natural mais abundante da Terra, fazendo com que sua participação na matriz energética do País seja predominante.

### 1.1 GERAÇÃO HIDRELÉTRICA

Podemos definir a geração de energia através das hidrelétricas, como um processo que envolve transformação da energia potencial da água, com determinada queda, em energia mecânica, isto é, através de uma turbina hidráulica. Assim, o gerador de energia é acionado, convertendo-a em eletricidade.

A história das hidrelétricas no mundo data do século XIX, conforme cita a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel):

A primeira hidrelétrica do mundo foi construída no final do século XIX – quando o carvão era o principal combustível e as pesquisas sobre petróleo ainda engatinhavam junto às quedas d’água das Cataratas do Niágara. Até então, a energia hidráulica da região tinha sido utilizada apenas para a produção de energia mecânica. Na mesma época, e ainda no reinado de D. Pedro II, o Brasil construiu a primeira hidrelétrica, no município de Diamantina, utilizando as águas do Ribeirão do Inferno, afluente do rio Jequitinhonha, com 0,5 MW (megawatt) de potência e linha de transmissão de dois quilômetros.<sup>7</sup>

As usinas hidrelétricas podem ser classificadas obedecendo às variáveis de vazão e queda d’água. Estas são fundamentais para a determinação dos tipos de turbina, barragem e reservatório. Os reservatórios podem ser do tipo acumulação e fio d’água.

O primeiro caso é caracterizado por centrais de alta queda, permitindo o acúmulo de grande quantidade de água, de maneira a estocar e suprir as necessidades em período de estiagem. No segundo caso, a fio d’água, como a usina objeto deste estudo, a geração de energia está condicionada ao fluxo de água do rio.

Essa classificação por tipo de operação é esclarecida por Pereira:

---

<sup>7</sup> AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008.** Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf). Acesso em: 1º. mar. 2015.

As usinas hidrelétricas a fio d'água são usinas sem reservatório de regularização, cujo nível de água operativo (NA) não varia (ou varia muito pouco). Nessas usinas, incluem-se as usinas com regularização diária ou semanal, que permitem o fornecimento da potência máxima em períodos de ponta. As usinas com reservatório, como o próprio nome diz, possuem reservatório de acumulação/regularização cujos níveis de água operativos variam bastante em função dos períodos de enchente e estiagem.<sup>8</sup>

A partir daí, podemos entender a classificação das usinas hidrelétricas, de acordo com o seu limite de potência. De 1 megawatt (MW) a 3 MW trata-se de uma Central Geradora Hidrelétrica (CGH). De 3 MW a 30 MW, consideramos uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e mais de 30 MW, uma Usina Hidrelétrica (UHE).

De acordo com dados do Banco de Informações de Geração, disponível no site da Agência Nacional de Energia Elétrica, atualizados do dia 17 de setembro de 2015, o Brasil conta com um total 4.266 empreendimentos em operação, o que representa 138.624.865 kW de potência instalada. Deste, 523 (CGH), 468 (PCH) e 198 (UHE). Se tratando de empreendimentos em construção; encontram-se nesta fase uma CGH, 34 (PCH) e 11 (UHE). Já os empreendimentos com construção não iniciada são 41 (CGH), 131 (PCH) e 4 (UHE).

Basicamente, a estrutura de uma usina é composta por barragem, casa de força, sistema de captação e adução de água e vertedouro. Estes componentes são descritos a seguir.

## 1.2 ESTRUTURA DO CIRCUITO DE ADUÇÃO

A barragem (Figura 1) tem finalidade de armazenar água para a irrigação e abastecimento, podendo ser unicamente de terra (homogênea) ou por diversos materiais mais impermeáveis que a terra como areia, saibro, etc.(zonadas) ou de concreto como é no caso de usinas com vertedouros em crista livre. Este conceito é dissertado pela Eletrobrás:

A barragem é a estrutura que tem a função de represar a água, visando, com a elevação do nível d'água do rio, possibilitar a alimentação da tomada d'água. No caso de locais de baixa queda, a barragem tem também a função de criar o desnível necessário à produção da energia desejada.<sup>9</sup>

---

<sup>8</sup> PEREIRA, Geraldo Magela. **Projeto de Usinas Hidrelétricas: Passo a Passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015

<sup>9</sup> ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudo e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. ANEEL, 2000

Figura 1- Barragem de Concreto CGH Bom Jesus



Fonte Próprio Autor<sup>10</sup>

Se tratando de barragens de concreto, o vertedouro (Figura 2) é incorporado ao barramento principal com a finalidade de escoar a água sobressalente, mas há outras configurações, dependendo do arranjo da usina. Também conhecido por extravasor, este tem a função de escoar a água excedente.

O Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas (2000, p. 98)<sup>11</sup> define que, “de forma geral, dependendo do porte da obra, nos projetos de PCH podem ser definidos três tipos básicos de solução para o extravasamento do excesso de água afluente ao local do aproveitamento:

- por um canal lateral, em cota elevada em relação ao leito natural do rio, com soleira vertedoura a jusante;
- por sobre o próprio corpo da barragem, ao longo de toda a extensão da crista ou parte dela;
- através da combinação dos tipos acima citados”.

---

<sup>10</sup>Barragem de Concreto CGH Bom Jesus- Fonte: Próprio Autor

<sup>11</sup>ELETOBRÁS. Diretrizes para Estudo e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas. ANEEL, 2000

Figura 2: Extravasores da UHE Aimorés



Fonte: Página oficial da Aliança Energia<sup>12</sup>

Sendo assim, trataremos agora da comporta (Figura 3), que é comum a qualquer tipo de usina, variando somente em relação ao tipo de barragem ou vertedouro. Estas permitem isolar o sistema montagem/desmontagem e manutenção. De acordo com o arranjo do projeto, pode estar presente na tomada d'água, extravasores, canal de adução e ou câmara de carga.

Segundo a Eletrobrás (2001, p. 178)<sup>13</sup>, “as comportas hidráulicas são previstas com o objetivo de bloquear uma passagem hidráulica, podendo operar normalmente fechadas ou normalmente abertas, de acordo com sua função”.

Outra definição é dada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas<sup>14</sup> (2001, p.1), como “dispositivo mecânico usado para controlar vazões hidráulicas em qualquer conduto livre ou forçado e de cuja estrutura o conduto é independente para sua continuidade física e operacional”.

---

<sup>12</sup>Disponível em: <<http://www.aliancaenergia.com.br/usinas/usina-de-aimores/>> Acesso em:mar.2015

<sup>13</sup>ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudo e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. ANEEL, 2000

<sup>14</sup>ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 759- Comportas hidráulicas - Terminologia**, 2001

Figura 3 - Comporta do extravasor- UHE Aimorés



Fonte: Página oficial da Aliança Energia<sup>15</sup>

Toda esta conceituação nos leva até a chamada tomada d'água, estrutura formada por comportas e arranjo civil, que permite a entrada de água no sistema de conduto forçado ou sistema de adução. Este, através de tubulação ou túnel, conduz a água até a turbina. Sua extensão varia de acordo com o projeto e pode ser único ou distinto de acordo com o número de unidades, podendo ser da ordem de alguns metros a até quilômetros.

Figura 4 - Tomada d'água - UHE Retiro Baixo



Fonte: Página oficial da Construtora Quebec<sup>16</sup>

<sup>15</sup> Disponível em: <<http://www.aliancaenergia.com.br/usinas/usina-de-aimores/>> Acesso em: mar.2015

<sup>16</sup> Disponível em: <<http://www.construtoraquebec.com.br/new/portfolio/uhe-retiro-baixo/>> Acesso em: mar.2015

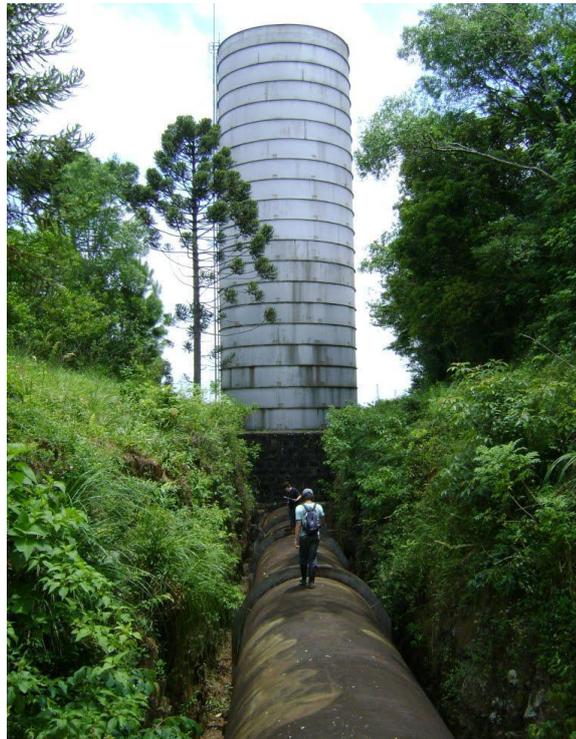
Figura 5 - Conduto Forçado



Fonte Próprio Autor<sup>17</sup>

Assim, entre a tomada d'água e a Casa de força, encontra-se a chamada chaminé de equilíbrio (Figura 6), estrutura civil ou metálica, cuja função é amortecer as sobre pressões causadas por variações bruscas na saída de água da turbina, seja por redução na geração ou corte instantâneo.

Figura 6 - Chaminé de equilíbrio



Fonte: [http://br.worldmapz.com/photo/75387\\_en.htm](http://br.worldmapz.com/photo/75387_en.htm))

---

<sup>17</sup>Conduto Forçado- Fonte: Próprio Autor

Diante disso, temos a chamada Casa de Força (Figura 7), onde está presente o maquinário responsável pela geração de energia elétrica, sendo toda a parte mecânica, elétrica, eletrônica e automação.

Figura 7–Casa de Força UHE Quilleco-Chile



Fonte: Página oficial da Energ Power<sup>18</sup>

Neste ponto, são expostos os equipamentos que fazem parte da Casa de Força. Trataremos dos três tipos principais de turbinas, usuais em usinas hidrelétricas, Kaplan, Francis e Pelton.

Assim, completa a ANEEL:

O aproveitamento da energia hidráulica para geração de energia elétrica é feito por meio do uso de turbinas hidráulicas, devidamente acopladas a um gerador. Com eficiência que pode chegar a 90%, as turbinas hidráulicas são atualmente as formas mais eficientes de conversão de energia primária em energia secundária.<sup>19</sup>

Segundo a ABNT (1987, p.3)<sup>20</sup>, que trata da terminologia das turbinas hidráulicas, turbinas bombas e bombas de acumulação, a turbina Francis (Figura 8) é considerada “de reação, na qual o fluxo d’água penetra radialmente no distribuidor e no rotor, no qual as pás são fixas”.

Na mesma norma (1987, p.3), turbina Kaplan (Figura 9) é definida como de “reação, na qual o fluxo d’água tem direção radial no distribuidor, aproximadamente axial na entrada

<sup>18</sup>Disponível em: <<http://ftp.energpower.com.br/fornecimentos.html>> Acesso em:mar.2015

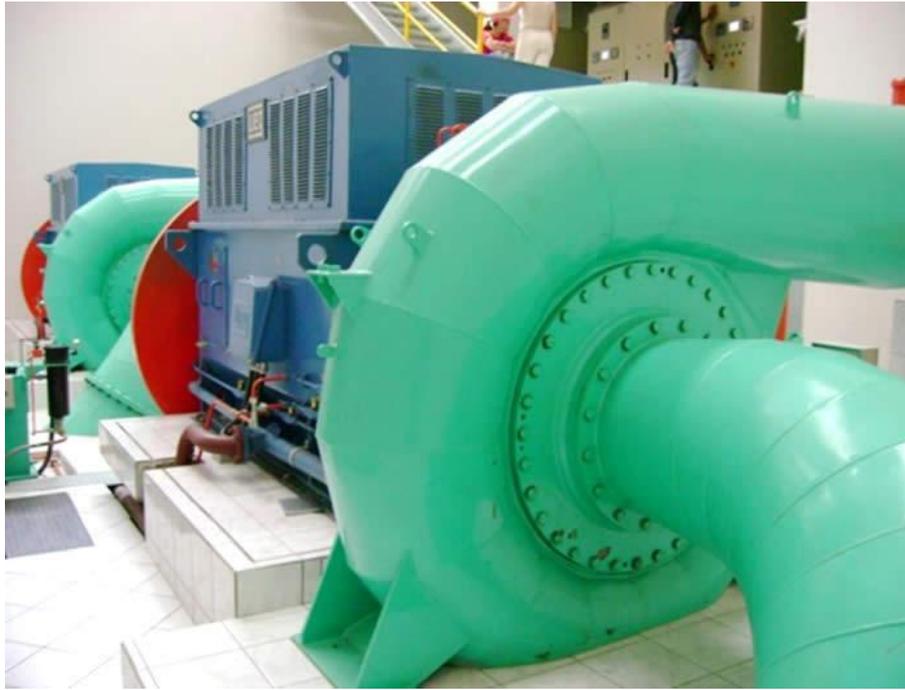
<sup>19</sup> Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, 2002

<sup>20</sup>ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 06445- Turbinas hidráulicas, turbinas-bombas e bombas de acumulação**, 2001

do rotor, analogamente à turbina hélice, porém no qual as pás têm passo regulável em funcionamento”.

A Pelton (Figura 10) é descrita como “de ação, na qual o fluxo d’água incide sob a forma de jato sobre o rotor possuindo pás em forma de duas conchas. A direção dos jatos é paralela em relação ao plano do rotor”.

Figura 8: Turbina Francis- PCH Cajú



Fonte: Página oficial: Página oficial da Hacker Geração<sup>21</sup>

Figura 9: Turbina Kaplan

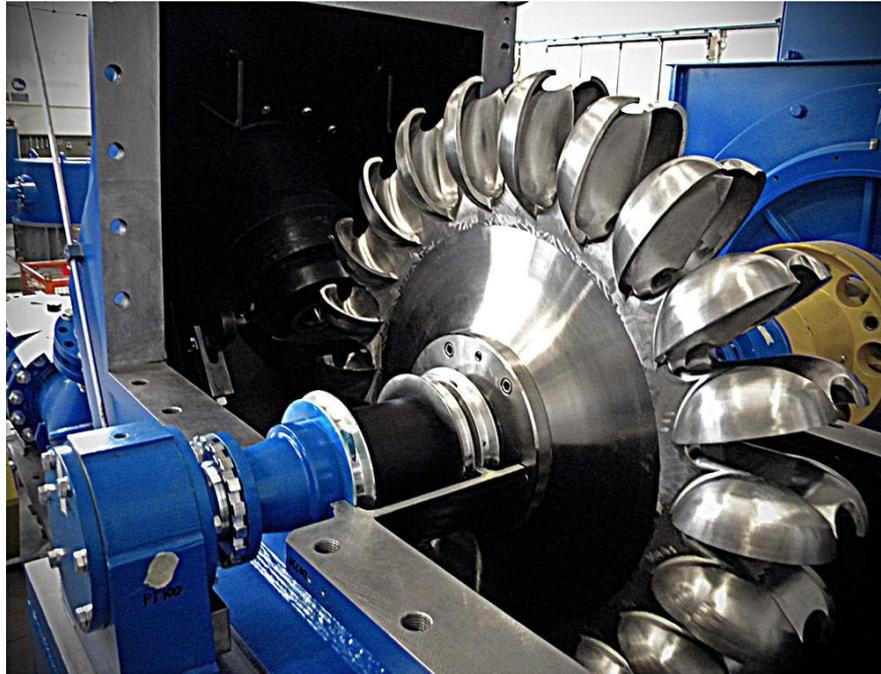


Fonte: Página oficial da Voith<sup>22</sup>

---

<sup>21</sup>Disponível em:<[http://www.hacker.ind.br/empresa\\_geracao.php](http://www.hacker.ind.br/empresa_geracao.php)> Acesso em:mar.2015

Figura 10: Turbina Pelton



Fonte: Página oficial da ZecoHydroPower<sup>23</sup>

E se tratando de usinas de pequeno porte, pode ser necessário ainda o uso do chamado volante de inércia, como explica a Eletrobrás:

Nas unidades geradoras de pequena capacidade pode ocorrer que o efeito de inércia ( $GD^2$ ) das massas girantes seja insuficiente para garantir uma regulação estável. Nesse caso, o regulador não terá capacidade para controlar as variações bruscas de carga na unidade geradora, dentro das condições de regulação estabelecidas.<sup>24</sup>

Já o sistema de regulação, ainda se tratando de PCH, controla a tomada de velocidade, permitindo-a mediante a rotação nominal de projeto, sincronizando unidade e rede, aborda Eletrobrás:

A seguir, o regulador comanda a tomada de carga até o valor estipulado pelo operador, permanecendo no monitoramento desse valor e certificando que a unidade está sincronizada com a rede. (...) O regulador de velocidade pode ser eletro-hidráulico ou digital. O regulador de velocidade é formado por duas partes distintas: a parte eletro eletrônica e a parte hidráulica ou atuador, sendo a ligação entre as partes feita pela válvula proporcional.<sup>25</sup>

Ainda, de acordo com o arranjo, se faz necessário a instalação da chamada válvula de segurança, instalada anexa à montante. Segundo Eletrobrás (2001, p. 179)<sup>26</sup>, “existência de uma única tubulação de adução, dividindo-se em duas ou mais para alimentação de diversas

<sup>22</sup>Disponível em: <<http://voith.com/br/produtos-e-servicos/energia-hidreletrica/turbinas/turbinas-kaplan-560.html>> Acesso em: mar.2015

<sup>23</sup>Disponível em: <<http://www.zeco.it/zeco-turbines/pelton-turbine/>> Acesso em: mar.2015

<sup>24</sup>ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudo e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. ANEEL, 2000

<sup>25</sup>ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudo e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. ANEEL, 2000

<sup>26</sup>ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudo e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. ANEEL, 2000

turbinas, quando, então, a Válvula de Segurança, individual para cada turbina, poderá controlar o fechamento de cada uma delas, sem interferência com as demais”.

A mais utilizada é a válvula borboleta, conforme descrição de Pereira:

As válvulas borboleta (butterfly valves), geralmente são as mais usadas como válvulas de emergência a montante das unidades de geração em uma usina hidrelétrica, onde os condutos forçados são longos, ou como válvulas de fechamento de emergência em tubulações de saída (outletworks)<sup>27</sup>

Segundo Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006, p.69)<sup>28</sup>, os transformadores elevadores são considerados “componente significativo de um sistema CA de potência, possibilita a geração elétrica e a transferência de energia nas tensões mais econômicas, além de permitir a utilização da energia mais adequada para um dado dispositivo particular”.

### 1.3 SISTEMA DIGITAL DE SUPERVISÃO E CONTROLE (SDSC)

Por fim, abordamos o conceito de Sistema Digital de Supervisão e Controle (SDSC). Antigamente, as usinas eram totalmente operadas presencialmente, o que implicava em um custo muito alto com funcionários, sem contar na ineficiência do sistema, que era mais susceptível às falhas humanas, uma vez que todo o controle, desde a barragem até a casa de força era feito pelo operador.

Isso demandava inúmeras sequências de ordens de serviço, manobra e uma atenção rigorosa do operador, uma vez que caso houvesse falta de atenção, pararia a linha de geração ou poderia danificar equipamentos, já que o sistema dependia única e exclusivamente da análise de um operador.

A necessidade de evolução já era uma realidade desde a Revolução Industrial, como aborda Silveira e Santos:

---

<sup>27</sup> PEREIRA, Geraldo Magela. **Projeto de Usinas Hidrelétricas: Passo a Passo**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015

<sup>28</sup> FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

A revolução industrial teve início na Inglaterra, em meados do século XVIII. Caracterizou-se, basicamente, pela introdução de máquinas simples que surgiram para a substituição da força muscular pela mecânica e tarefas repetitivas executadas pelo homem. Com efeito, essas atividades passaram por uma evolução mais rápida, dando origem na Inglaterra, a era mundial.<sup>29</sup>

Com o passar do tempo, viu-se que todo o processo poderia ser controlado/supervisionado de maneira automática, de acordo com lógicas e filosofias de operação desenvolvidas por um grupo de engenheiros, que estariam bem menos suscetíveis a erros do que sistemas que dependem da atuação instantânea de alguém no local. Daí surgiu-se a ideia de automatização. Assim, abriu-se uma subdivisão nessa área, chamada de SDSC, sistema digital que supervisiona e controla o sistema de acordo com essa lógica.

Nesse sistema estão presentes diversas informações de pontos cruciais da planta e que são de extrema importância em um controle fino. Ou seja, tem a capacidade de “pensar” no que deveria fazer de acordo com uma ação que ocorreu no sistema, seja ela interna ou externa.

Logo esses sistemas têm informações de diversas variáveis de entrada, que informam ao SDSC a condição que está determinada máquina, como posição, altura, temperatura, velocidade, pressão, vazão, nível dentre outros.

De acordo com essas variáveis, tomará alguma decisão, por exemplo, se a turbina começar a rodar acima da velocidade permitida acionará uma variável de saída manipulável, que fechará a borboleta e também abrirá o disjuntor e indicará um sinal de alarme para a O&M da usina tomar as devidas providências.

---

<sup>29</sup> SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e controle discreto**. 9 ed. reimpr. São Paulo: Érica, 2013

## CAPÍTULO II- MONITORAMENTO E CONTROLE DE PROCESSOS

Após um introdutório sobre usinas hidrelétricas e suas particularidades, faz-se necessário abordar os mecanismos e equipamentos utilizados no monitoramento e controle de processos. Serão a partir deles o desenvolvimento do sistema de controle de geração da CGH Ponte Queimada.

### 2.1 SINAIS E MEDIDAS

Os sinais elétricos da informação podem ser analógicos e digitais. O sinal analógico pode ser definido como aquele capaz de assumir infinitos valores dentro de um intervalo qualquer, seja de tensão ou corrente, que se destina a informar a um sistema um valor de comparação, para que este tome uma decisão.

Já o sinal digital pode ser descrito como aquele que tem somente dois estados: 0 ou 1 ou fechado e aberto. Indica, por exemplo, uma posição de um determinado equipamento para que o PLC possa tomar decisões, de acordo com critérios programados em sua lógica.

Ambos os sinais são abordados por Lathi:

Um sinal cuja amplitude pode assumir qualquer valor em uma faixa contínua é um sinal contínuo. Isto significa que a amplitude de um sinal analógico pode assumir infinitos valores. Um sinal digital, por outro lado, é aquele cuja amplitude pode assumir apenas alguns números finitos de valores (...) Fica claro que um sinal analógico não é necessariamente um sinal contínuo no tempo e que um sinal digital não é necessariamente um sinal discreto no tempo.<sup>30</sup>

Se tratando da medição de grandezas que não são elétricas, torna-se usual os chamados transdutores, de modo a gerar um sinal elétrico. Este é o papel dos sensores, instrumentos que convertem uma determinada grandeza para um valor mensurável pelo sistema de controle/automação de uma planta.

Este conceito é abordado por Medeiros (2004, p.43)<sup>31</sup>, em que “as fontes de informação geram voz, música, imagem e dados. A voz, a música e a imagem são convertidas em sinais elétricos analógicos por transdutores”.

---

<sup>30</sup> LATHI, B.P. **Sinais e Sistemas Lineares**. Tradução de Gustavo Guimarães Parma. 2. ed. porto Alegre: Bookman, 2007

<sup>31</sup> MEDEIROS, J. C. O. **Princípios de telecomunicações: teoria e prática**. São Paulo: Editora. Érica, 2004

Podemos considerar que um faz parte do outro. O sensor é a parte que sente a grandeza, enquanto o transdutor tem o sensor incorporado, além da parte que engloba todos os circuitos responsáveis pela conversão dos sinais para os sistemas. Os sensores são vistos mais detalhadamente, a seguir.

## 2.2 SENSORES

Os sensores têm papel fundamental na geração de sinais, aproveitados por circuitos eletrônicos, como ressalta Tooley:

Um sensor é um tipo especial de transdutor utilizado para gerar um sinal de entrada para um sistema de medição, instrumentação ou controle. O sinal produzido por um sensor é uma analogia elétrica de uma quantidade física, tal como distância, velocidade, aceleração, temperatura, pressão, nível de luminosidade, etc. Os sinais que retornam de um sensor junto com as entradas de controle do usuário ou controlador (conforme for apropriado) serão utilizados depois para determinar a saída do sistema.<sup>32</sup>

Eles podem converter sinais de temperatura, pressão, altura, volume, distância e posição para um determinado valor de tensão (0-10V) ou corrente (4-20mA). Thomazini e Albuquerque falam sobre as características destes equipamentos:

Um sensor nem sempre tem as características elétricas necessárias para ser utilizado em um sistema de controle. Normalmente, o sinal de saída deve ser manipulado antes da sua leitura no sistema de controle. Isso geralmente é realizado com um circuito de interface para produção de um sinal que possa ser lido pelo controlador.<sup>33</sup>

Além disso, podem ser analógicos ou digitais. No sensor analógico, temos uma variação de qualquer valor na sua saída, desde que esteja na faixa de operação, conforme ilustra a figura 11. Também dissertam Thomazini e Albuquerque:

Algumas das grandezas físicas que podem assumir qualquer valor ao longo do tempo são: pressão, temperatura, velocidade, umidade, vazão, força, ângulo, distância, torque, luminosidade. Essas variáveis são mensuradas por elementos sensíveis com circuitos eletrônicos não digitais.<sup>34</sup>

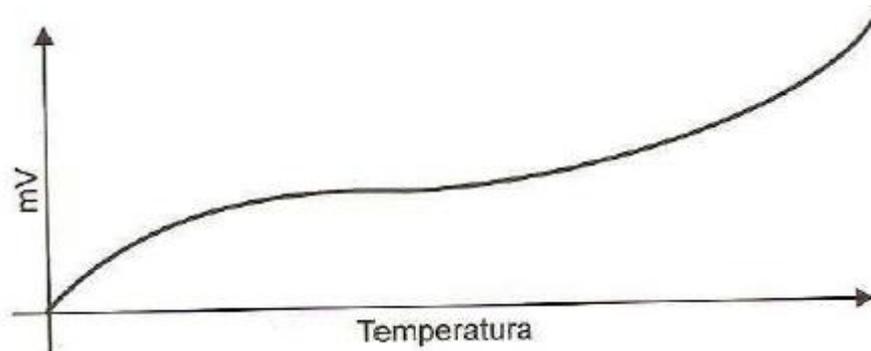
---

<sup>32</sup> TOOLEY, Mike. **Circuitos eletrônicos– Fundamentos e Aplicações**. Tradução Luis Cláudio de Queiroz Faria. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007

<sup>33</sup> THOMAZINI, Daniel. ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações**. 5.ed. São Paulo: Érica, 2005

<sup>34</sup> THOMAZINI, Daniel. ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações**. 5.ed. São Paulo: Érica, 2005

Figura 11: Variação da grandeza física do sensor analógico

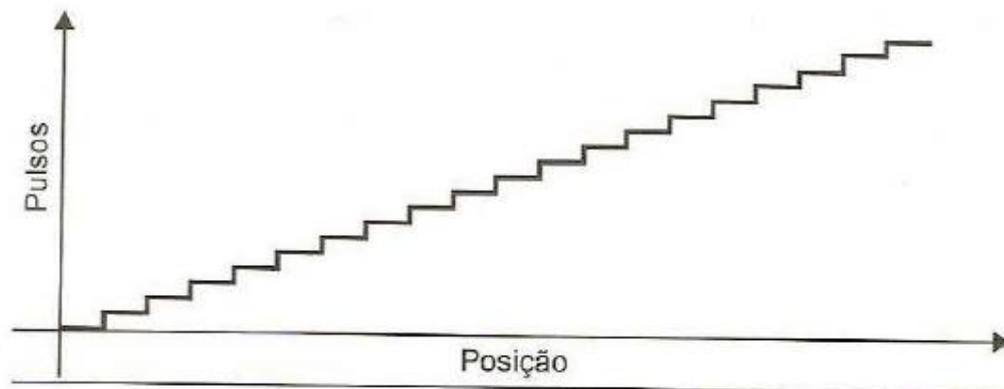


Fonte: Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações<sup>35</sup>

Já os sensores industriais podem assumir dois valores: 0 ou 1, ou ainda NA ou NF. Estes valores são utilizados em processos em que preciso saber se determinado item está ou não está atuado (figura 12), explica Lamb:

Os sensores discretos são digitais e fornecem um sinal de liga ou desliga (on ou off). Muitos deles vêm com um cabo ligado para a terminação em um gabinete de controle, mas outros possuem uma variedade de opções de cabos com “desconexões rápidas” (QD, *QuickDisconnect*). Eles estão disponíveis nas configurações de sinais de saídas em 24 VCC, 10 VCA ou contato fechado<sup>36</sup>

Figura 12: Exemplo posição de objeto em encoder incremental



Fonte: Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações<sup>37</sup>

Assim, os transdutores e qualquer sistema de medidas, possuem algumas características importantes, tais como sensibilidade, exatidão, precisão, estabilidade e velocidade de resposta.

<sup>35</sup>THOMAZINI, Daniel. ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2005

<sup>36</sup> LAMB, Frank. **Automação Industrial na Prática - Série Tekne**. Tradução Márcio José Cunha. São Paulo: AMGH, 2015

<sup>37</sup>THOMAZINI, Daniel. ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2005

Segundo Thomazini e Albuquerque (2005, p.22)<sup>38</sup>, **sensibilidade** pode ser considerada o “ganho entre o sinal de saída e de entrada para um dado sensor ou transdutor”.

Ou seja, seria basicamente a variação nos sinais de entrada/saída. Caso haja uma variação no sinal de entrada, ainda que pequena, ele fornecerá uma variação também pequena na saída. Este ponto é crucial para as aplicações em que se faz necessário o chamado controle fino, demandando uma resposta mais rápida do circuito.

Outra característica, **exatidão**, é descrita pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia<sup>39</sup> como “grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurado”.

Opinião é semelhante à de Medeiros Filho:

A exatidão de um instrumento é considerada, em relação a um padrão, a um valor aceito como verdadeiro. Pode-se dizer que a exatidão está diretamente relacionada com as características próprias do instrumento, a forma como foi projetado e construído. Os erros sistemáticos é que definem se um instrumento é mais exato ou menos exato que outro.<sup>40</sup>

A **precisão** é a característica que um transdutor possui de se manter fiel ao valor lido no processo, assim como a medida máxima de erro de leitura registrada em determinado processo. Ela se sobressai em instrumentos digitais, como atesta Ribeiro:

A precisão é uma segunda vantagem do instrumento digital sobre o analógico. Embora a precisão dependa da qualidade e do projeto do instrumento, em geral, o instrumento digital é mais preciso que o analógico de mesmo custo. Tipicamente, a precisão do digital é de 0,1% e do analógico é de 1%.<sup>41</sup>

**Estabilidade** é tida como um fator essencial ao projeto, uma vez que indica flutuação do sinal na saída do sensor. Se a flutuação for bem alta, é perceptível que se tem uma baixa estabilidade. Assim, o sinal da saída será instável, sofrendo variações que prejudicarão o controle por parte do PLC, conforme complementa Bolton:

A estabilidade de um transdutor é a sua capacidade de fornecer a mesma saída quando usado para medir uma entrada constante ao longo de um período de tempo. O termo deriva (drift) é frequentemente usado para descrever a variação na saída que ocorre ao longo do tempo. O termo deriva zero é usado para as variações que ocorrem na saída quando a entrada é zero.<sup>42</sup>

---

<sup>38</sup> THOMAZINI, Daniel. ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2005

<sup>39</sup> INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia- VIM**. Versão brasileira do "Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology". Rio de Janeiro: INMETRO, 1995.

<sup>40</sup> MEDEIROS FILHO, Solon de. **Fundamentos de medidas elétricas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1981.

<sup>41</sup> RIBEIRO, Marco Antônio. **Instrumentação**. 9. ed. Salvador, 1999. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAEjlcAA/instrumentacao-marco-antonio-ribeiro>>. Acesso em: 5/10/2015

<sup>42</sup> BOLTON, W. **Mecatrônica: Uma Abordagem Multidisciplinar**. 4.ed.Porto Alegre: Book-man.2010

Por fim, temos a **velocidade de resposta**. Concluimos que em sistemas que exijam um controle bem fino; quanto mais rápida a resposta, melhor. Em caso de sistemas que tenham uma resposta demorada pode-se comprometer o controle a ser executado.

Para efeito de entendimento, vamos definir, especificamente, dentre os tipos de sensores, o mais utilizado nas aplicações industriais, o sensor de nível.

### 2.2.1 SENSOR DE NÍVEL

Os sensores de nível são utilizados em aplicações específicas, de acordo com Thomazini e Albuquerque:

Os sensores de nível são utilizados para o controle de líquidos ou grãos sólidos, contidos em reservatórios, silos, tanques abertos, tanques pressurizados na indústria. São leis na detecção de um nível simples (chave de nível- alarma ou sinaliza, quando atinge um determinado ponto) e na medição contínua.<sup>43</sup>

O processo de medição de nível é abordado por Balbinot e Brusamarello:

Um fato que é bastante comum na medição de nível é a aplicação de detectores. Nesse caso são implementados sistemas que monitoram estados de níveis, tais como estado de nível máximo e estado de nível mínimo. Ainda é possível, com esse tipo de procedimento, o monitoramento do nível de determinado produto de acordo com a quantidade e a posição dos detectores, o que caracteriza uma saída digital.<sup>44</sup>

Dentro dos sensores de nível ainda há uma subdivisão, da qual não trataremos, citando apenas o utilizado nesta pesquisa, o ultrassônico.

### 2.2.2 SENSOR ULTRASSÔNICO

Assim, o sensor ultrassônico (Figura 9) é descrito por Ordonez, Penteado e Silva:

O princípio de funcionamento do sensor ultrassônico baseia-se no princípio de que o som tem uma velocidade relativamente constante. O tempo para a onda sonora atingir um objeto e retorna é diretamente proporcional à distância do sensor ao objeto. Consequentemente, os sensores ultrassônicos são utilizados com muita frequência em aplicações nas quais se deseja medir distâncias.<sup>45</sup>

---

<sup>43</sup> THOMAZINI, Daniel. ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações**. 5ª ed. São Paulo: Érica, 2005

<sup>44</sup> BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2 ed. Rio de Janeiro: LT, 2011

<sup>45</sup> ORDONEZ, Edward D. M. ; PENTEADO, Cesar G.; SILVA, Alexandre C.R. **Microcontroladores e FPGAs- Aplicações em Automação**. 1 ed. São Paulo: Novatec, 2006

Este tipo de sensor se divide em composição por transdutor, comparador, circuito detector e saída. O transdutor atua como emissor e receptor. A onda sonora atravessa o sensor e se reflete no objeto, conduzindo o pulso de eco ao transdutor, no papel de receptor.

Neste ponto o comparador atua detectando a distância através de parâmetros comparativos entre a velocidade do som e o tempo emissor-receptor. Finalmente, a saída tem o papel de gerar um sinal que será sentido pelo PLC.

Suas características de operação também são expressas por Ordonez, Penteado e Silva:

Em geral, os sensores ultrassônicos industriais operam a uma frequência entre 25 a 500 KHZ. (...) A frequência empregada no sensor é inversamente proporcional ao alcance máximo do sensor ao objeto que se pretende detectar. Enquanto uma onda sonora com a frequência de 50 kHz pode trabalhar a uma distância de 10 m ou mais, uma onda sonora com frequência de 200 kHz está limitada a uma distância de um metro.<sup>46</sup>

Figura 13: Sensor de nível ultrassônico



Fonte: Próprio Autor

Agora que já tratamos de todos os conceitos que envolvem transmissão de sinais e sensores, podemos abordar o cérebro desta pesquisa: o PLC.

---

<sup>46</sup> ORDONEZ, Edward D. M. ; PENTEADO, Cesar G.; SILVA, Alexandre C.R. **Microcontroladores e FPGAs- Aplicações em Automação**. 1 ed. São Paulo: Novatec, 2006

## 2.3 PLC

Durante o processo de evolução, na década de 50, a indústria contava com um avanço cada vez mais necessário em sua linha de produção, buscando aperfeiçoamento, qualidade e velocidade com um índice cada vez melhor. Até então, toda a linha de produção “semiautomática”, era feita por relés interligados que, de acordo com uma lógica elétrica realizava as operações para qual o circuito foi projetado.

Qualquer problema que ocorria na linha de produção demandava incontáveis horas de busca, uma vez que essa falha poderia partir de diversos pontos, como oxidação, má conexão, problemas em relés e até mesmo cabos com ligação errada.

O circuito depois de pronto atendia perfeitamente aquela linha de produção para a qual foi projetado, porém, como o projeto de controle era todo físico qualquer alteração de uma peça por menor que fosse resultava na alteração do projeto elétrico de todo o painel envolvido e, dependendo da alteração, também atingia aos demais que estavam interligados.

Após toda esta problemática, no ano de 1968, os controladores de lógica programável começaram a ser difundidos, a partir da General Motors Corporation, como cita Silveira e Santos:

Essa primeira geração de PLC, como poderia ser denominado, recebeu sensíveis melhorias com o advento dos microprocessadores ocorrido durante os anos 70. Assim, não se tornava necessário o uso de computadores de grande porte, tornando-o uma unidade isolada. Foram adicionados ainda recursos importantes tais como interfaces de operação e programação facilitadas ao usuário, instruções de aritmética e de manipulação de dados poderosas, recursos de comunicação por meio de redes de PLC, possibilidades de configuração específica a cada finalidade por meio de módulos intercambiáveis, dentre outras inúmeras vantagens encontradas nos modelos comerciais que estão atualmente disponíveis<sup>47</sup>

As vantagens do PLC em comparação aos relés são descritas por Petruzella:

Controladores Programáveis oferecem várias vantagens em relação aos controles a relés convencionais. Os relés precisam ser instalados para executar uma função específica, quando o sistema requer uma modificação, os condutores do relé precisam ser substituídos ou modificados. (...) Com o CLP a maior parte desse trabalho com fiação foi eliminado, além disso, ele tem dimensões e custos reduzidos.<sup>48</sup>

Como dito anteriormente, o PLC (Figura 14) é composto basicamente por hardware e software. O hardware pode ser considerado a parte física, que está ao nosso alcance, destinada

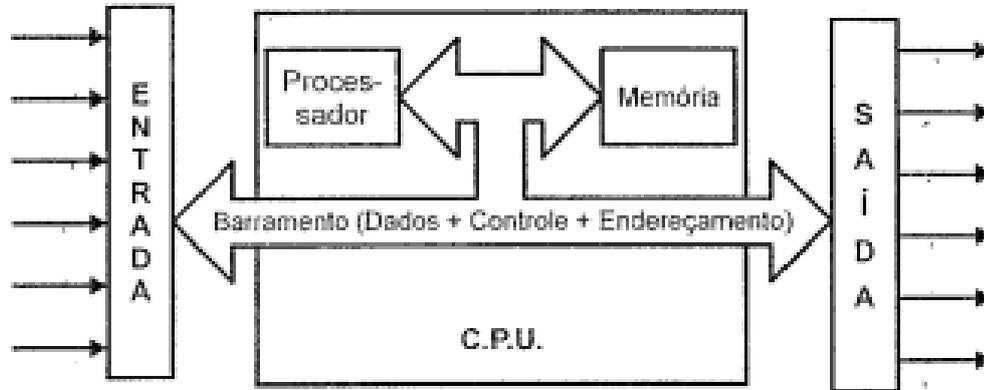
---

<sup>47</sup> SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e controle discreto**. 9 ed. reimpr. São Paulo: Érica, 2013

<sup>48</sup> PETRUZELLA, Frank. **Controladores lógicos programáveis**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2010

à entrada das variáveis, contendo as informações para a análise por meio do circuito. Nessa parte física podemos contar com CPU e memória.

Figura 14: PLC- Diagrama de Blocos



Fonte: Automação e Controle Discreto<sup>49</sup>

A capacidade de processamento, velocidade e qualidade das ações em um processo são diretamente interligadas com a qualidade do clock do processador do PLC, pois é ele que recebe as variáveis e toma a decisão do que fazer de acordo com a lógica implantada no sistema, conforme explora Silveira e Santos:

A unidade Central de Processamento pode ser encarada como o “cérebro” que controla todas as ações de um PLC, e é constituída por um processador, memórias e um sistemas de interligação (barramento). (...) A principal função do processador é o gerenciamento de todo o sistema composto pelo PLC. Tal função é efetuada pelo executivo, semelhante a um sistema operacional de computador (...).<sup>50</sup>

Se tratando de armazenamento, temos cinco tipos de memória: RAM, ROM, PROM, EPROM e EEPROM. Serão abordados os três tipos principais e mais usuais nos PLCs.

A memória RAM dá a liberdade de gravar e alterar dados de maneira simplificada. De acordo com Silveira e Santos (2013, p.86)<sup>51</sup>, “no PLC, são utilizadas para formar uma área de armazenamento temporário como uma espécie de rascunho de informações tanto de dados como de programas”.

A memória ROM não muda após a inserção no PLC e dita parâmetros primordiais quanto ao seu funcionamento. Porém, o único meio de acesso a essa memória é a leitura. Sua execução é exposta por Enderlein:

<sup>49</sup>SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e controle discreto**. 9 ed. reimpr. São Paulo: Érica, 2013

<sup>50</sup> SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e controle discreto**. 9 ed. reimpr. São Paulo: Érica, 2013

<sup>51</sup> SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e controle discreto**. 9 ed. reimpr. São Paulo: Érica, 2013

Formalmente uma ROM executa uma função OU: quando uma célula é endereçada, ou seja, a entrada da célula fica 1, na saída aparece 1 independentemente do que ocorre na outra entrada. Quando a célula não é endereçada, a saída será 0. No entanto a saída só passa para a linha de leitura se a célula estiver ligada a ela. Nisto consiste a programação da ROM.<sup>52</sup>

Já a EEPROM é largamente utilizada nos sistemas de memórias do PLC, apresentando alguns pontos positivos em sua aplicação, como afirma Tokheim:

A EEPROM é um terceiro tipo de memória de somente leitura programável, sendo chamada de memória PROM eletricamente apagável ou E<sup>2</sup>PROM. Como o próprio nome sugere, podem ser apagadas eletricamente, de modo que é possível reprogramá-las sem que sejam removidas da placa do circuito. A memória EEPROM pode ser reprogramada um byte por vez.<sup>53</sup>

Todas estas conceituações nos levam ao conceito de programação, que pode ser considerada uma sequência organizada na linguagem do PLC, que define a ele, instruções de como proceder e o que fazer de acordo com as variáveis de entrada, podendo ativar ou não as variáveis de saída, no controle de determinado processo.

Isto é reforçado por Franchi e Camargo:

Programar significa fornecer uma série de instruções a um sistema com capacidade computacional, de maneira que este seja capaz de comportar-se deterministicamente, executando de forma automática as decisões de controle em função do estado atual, das entradas e das saídas do sistema num dado instante<sup>54</sup>

Assim temos de definir como o PLC faz o controle, de acordo com as variáveis de entrada/saída, como explica Petruzella:

Dispositivos de entrada, como botões de comando, chaves-limite e sensores são equipamentos para os terminais de entrada, enquanto os dispositivos de saída como os pequenos motores, motores de partida, válvulas solenoides e sinaleiros são equipamentos para os terminais de saída<sup>55</sup>

Toda a evolução dos dispositivos de controle, até finalmente chegar ao PLC não teria sentido se a alteração da lógica de funcionamento não fosse de maneira fácil, a fim de alterar qualquer parâmetro que antes era complicado devido às alterações terem de ser físicas.

Logo, foi desenvolvida a linguagem de programação com lógica bem semelhante a análise de circuitos elétricos, favorecendo a integração de técnicos e engenheiros, sendo dividida em quatro lógicas de programação: Diagrama de Contatos, Blocos Funcionais, Mnemônicos Booleanos e Parâmetros idiomáticos.

---

<sup>52</sup> ENDERLEIN, R. **Microeletrônica: Uma Introdução ao Universo dos Microchips, seu. Funcionamento, Fabricação e Aplicações.** EDUSP, 1994

<sup>53</sup> TOKHEIM, Roger L. **Fundamentos de Eletrônica Digital - Vol.2: Sistemas Sequenciais-** McGraw-Hill, 2013

<sup>54</sup> FRANCHI, Claiton Moro; CAMARGO, Valter Luis Arlindo de. **Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos.** São Paulo: Érica, 2008

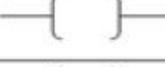
<sup>55</sup> PETRUZELLA, Frank. **Controladores lógicos programáveis.** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2010.

No entanto, a maneira mais simplificada de se enxergar uma programação em PLC é sem sombra de dúvida a Ladder, confirma Rosário:

Essa linguagem baseia-se nos relés de contatos dos sistemas elétricos convencionais, sendo, por isso, uma linguagem gráfica de fácil manipulação, pois mesmo existindo diferenças entre os fabricantes quanto às representações das instruções, são facilmente assimiladas pelo usuário. (...) Na linguagem ladder, cada contacto pode assumir dois estados (fechado ou aberto) representando uma variável booleana, ou seja, uma variável que assume dois estados: verdadeiro ou falso<sup>56</sup>

Este tipo de linguagem também é abordado por Dunn (2013, p.238)<sup>57</sup>, que afirma que “os programas são normalmente criados usando redes em escada (ladder), onde cada degrau da escada é uma instrução para a ação que deve ser tomada em nível de dados de entrada fornecido”.

Tabela 1: Linguagem em ladder, instruções básicas

Contato Normalmente Aberto		Conduz quando o bit do objeto que o controla é 1, ou seja, quando é ativado.
Contato normalmente Fechado		Conduz quando o bit do objeto que controla é 0, ou seja, quando não está ativado.
Contato detecção borda de subida		Conduz quando o bit do objeto que o controla muda de 0 para 1, ou seja, na borda de subida.
Contato Detecção borda de descida		Conduz quando o bit do objeto que controla muda de 1 para 0, ou seja, na borda de descida.
Bobina Normalmente Desenergizada		Na zona de teste, enquanto o resultado for 1, a bobina mantém-se energizada.
Bobina Normalmente Energizada		Na zona de teste, enquanto o resultado for 0, a bobina mantém-se energizada.
Bobina Retentiva (Set)		Na zona de teste, quando o valor resultante for 1.
Bobina não Retentiva (Reset)		Torna a saída desenergizada quando o valor resultante na zona de teste for 1.

Fonte: Automação Industrial<sup>58</sup>

No entanto, durante os processos utilizados na indústria, muitas vezes se faz necessária conversão de sinais analógicos para digitais e vice-versa, como acrescenta Ribeiro:

Geralmente, o conversor A/D e D/A está associado ao multiplexador, que converte várias entradas em uma única saída e o demultiplexador, que converte uma entrada em várias saídas. O conjunto conversor A/D e D/A e multiplexador e demultiplexador é também chamado de Modem (MODuladorDEMulador)<sup>59</sup>

<sup>56</sup> ROSÁRIO, João Maurício. **Automação Industrial**. São Paulo- Baraúna, 2009

<sup>57</sup> DUNN, W. C. **Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos**. Porto Alegre: Bookman, 2013

<sup>58</sup> ROSÁRIO, João Maurício. **Automação Industrial**. São Paulo- Baraúna, 2009

<sup>59</sup> RIBEIRO, Marco Antônio. **Instrumentação**. 9. ed. Salvador, 1999. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAEjlcAA/instrumentacao-marco-antonio-ribeiro>>. Acesso em: 5/10/2015

Portanto, concluem-se todas as informações necessárias para elaboração da lógica de programação e realização de testes na usina, que estarão dispostos no capítulo 3.

## CAPÍTULO III- ESTUDO DE CASO

A partir das informações dispostas nos capítulos anteriores, que envolvem o conhecimento de componentes de uma usina hidrelétrica e o estudo de sinais, programação e sensores, foi dado início ao estudo de caso na CGH Ponte Queimada.

Esse estudo se dividiu em reconhecimento do espaço; análise de documentação mediante autorização da empresa, o que inclui as variáveis do sistema de controle que já opera na empresa e que precisaram ser identificadas para prosseguir com o projeto em questão, de aprimorá-lo; elaboração da lógica de programação de comparação do nível montante; realização de testes e, por fim, implantação do sistema na usina. Posteriormente, foi acompanhado o comportamento da usina pós-implantação, através de gráficos de monitoramento da potência ativa, em períodos de 24 horas.

### 3.1- DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A Central Geradora Hidrelétrica Ponte Queimada, localizada na Fazenda do Porto, no distrito de São José do Porto, zona rural do município de Bom Jesus do Galho conta com potência instalada de 1,0 MW. O empreendimento está fixado em área de cobertura da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), com tensão de transmissão de 13,8 kV; assim, a conexão é realizada em linha trifásica de mesma tensão, próxima ao local.

Trata-se de um aproveitamento hidrelétrico de pequeno porte com derivação, portanto, apresenta-se em arranjo compacto, dispensando a formação de reservatório (operando a fio d'água), com um pequeno barramento de um metro de altura, utilizando-se de captação direta. A área usufruída pelo proprietário mediante ocupação do projeto é de 14,52 hectares, sendo que 0,5425 hectares são destinados à ocupação do arranjo físico, ou seja, 3,73% do total.

Na margem esquerda do rio, está disposta a chamada tomada d'água, incluindo grade e comporta do tipo ensecadeira. O conduto tem início junto à transição na tomada d'água, terminando próximo a uma transição para o conduto forçado em aço.

As águas são conduzidas até a casa de força (Figura 15), por meio de um circuito de alta pressão, revestido por tubo em aço, que tem início junto à transição com o conduto de baixa pressão finalizando junto à válvula borboleta. Por sua vez, a casa de força (28 x 7 m)

abriga dois conjuntos de turbina-gerador, constituídos por duas turbinas do tipo Francis, cuja potência nominal é de 526 kW, podendo chegar a 550 kW; além de painéis elétricos e demais equipamentos primordiais ao funcionamento da usina, considerando a operação e manutenção.

De modo a garantir a manutenção da vazão ecológica no Trecho de Vazão Reduzida (TVR) da CGH Ponte Queimada, que é de 0,5 m<sup>3</sup> por segundo, há um chanfro (espaço) no meio do barramento, de modo a efetuar a respectiva descarga. A usina entrou em operação no dia 10 de maio de 2015.

Figura 15: Casa de força da CGH Ponte queimada



Fonte: Próprio Autor

### 3.2- PARADAS NÃO PROGRAMADAS

Uma vez que o controle de geração é realizado de maneira manual pelo operador, a CGH Ponte Queimada tem registrado inúmeras ocorrências de paradas não programadas, provocadas pela saída das unidades geradoras por potência reversa, onde o nível baixou, o

operador não viu, perdeu a pressão e a máquina saiu. Além disso, a usina também está condicionada à perda de água, pois se o nível montante subir e o operador não estiver verificado, irá se perder geração.

Quando a potência não está regulada de acordo com a vazão, a turbina tende a consumir mais do que tem no lago, pois o distribuidor abrirá para tentar manter a potência setada pelo operador, até o ponto em que abrirá 100% e ocorrerá a perda de pressão no conduto, reduzindo a potência mecânica para o gerador. Nesta perda de potência da turbina ao longo da operação normal da máquina, o gerador passa a consumir ao invés de fornecer potência ativa ao sistema, se comportando como uma carga.

A seguir, são apresentadas todas as ocorrências registradas por potência reversa nas duas unidades geradoras, dos meses de julho a outubro de 2015. Os dados são do relatório mensal da O & M.

Tabela 2: Saída por potência reversa na unidade geradora 1

<b>Motivo da saída</b>	<b>Data/hora da saída</b>	<b>Data/hora da saída</b>	<b>Tempo de parada (horas)</b>
Potência reversa 2° estágio	25/9/15 18:32	25/9/15 18:49	0,28
Potência reversa 2° estágio	14/10/15 19:14	14/10/15 19:16	0,03
Potência reversa 2° estágio	15/10/15 19:04	15/10/15 19:30	0,43
Potência reversa 2° estágio	16/10/15 16:52	16/10/15 17:19	0,45
Potência reversa 2° estágio	26/10/15 1:10	26/10/15 1:24	0, 23
Potência reversa 2° estágio	27/10/15 20:13	27/10/15 20:37	0,40

Fonte: Relatório O & M da CGH Ponte Queimada

Tabela 3: Saída por potência da unidade geradora 2

<b>Motivo da saída</b>	<b>Data/hora da saída</b>	<b>Data/hora da volta</b>	<b>Tempo de parada (horas)</b>
Potência reversa 2° estágio	20/07/2015-11h41	20/07/2015-12h	0,32
Potência reversa 2° estágio	22/07/2015-18h11	22/07/2015-18h28	0,28
Potência reversa 2° estágio	24/07/2015- 14h24	24/07/2015- 14h35	0,18
Potência reversa 2° estágio	30/07/2015- 23h47	31/7/2015- 0h13	0,43
Potência reversa 2° estágio	1/8/2015- 20h38	1/8/2015- 20h54	0,27
Potência reversa 2° estágio	5/8/2015 1h12	5/8/2015-1h39	0,45

Potência reversa 2° estágio	7/8/2015-12h33	7/8/2015-12h45	0,20
Potência reversa 2° estágio	11/8/2015- 5h27	11/8/2015- 5h40	0,22
Potência reversa 2° estágio	12/8/2015- 5h34	12/8/2015- 5h49	0,25
Potência reversa 2° estágio	14/8/2015- 0h	14/8/2015 0h16	0,27
Potência reversa 2° estágio	14/8/2015-5h10	14/8/2015 6h09	0,98
Potência reversa 2° estágio	15/8/2015- 5h29	15/8/2015 5h40	0,18
Potência reversa 2° estágio	16/8/2015 3h50	16/8/2015 4h08	0,30
Potência reversa 2° estágio	18/8/2015-3h39	18/8/2015- 4h04	0,42
Potência reversa 2° estágio	24/8/2015- 1h57	24/8/2015-2h10	0,22
Potência reversa 2° estágio	26/8/2015- 0h55	26/8/2015-1h10	0,25
Potência reversa 2° estágio	27/8/2015- 4h45	27/8/2015-6h18	1,55
Potência reversa 2° estágio	27/8/2015-12h27	27/8/2015-12h43	0,27
Potência reversa 2° estágio	27/8/2015- 22h41	27/8/2015 23h14	0,55
Potência reversa 2° estágio	1/9/2015-23h53	2/9/2015- 0h13	0,33
Potência reversa 2° estágio	2/9/2015-15h56	2/9/2015- 16h40	0,73
Potência reversa 2° estágio	2/9/2015-23h09	2/9/2015- 23h36	0,45
Potência reversa 2° estágio	3/9/2015- 4h35	3/9/2015-5h03	0,47
Potência reversa 2° estágio	5/9/2015-5h25	5/9/2015-5h49	0,40
Potência reversa 2° estágio	5/9/2015-13h57	5/9/15-14h29	0,53
Potência reversa 2° estágio	5/9/2015- 21h18	5/9/2015- 21h32	0,23
Potência reversa 2° estágio	8/9/2015- 5h21	8/9/2015- 5h36	0,25
Potência reversa 2° estágio	8/9/2015-12h34	8/9/2015- 12h57	0,38
Potência reversa 2° estágio	13/9/2015- 2h48	13/9/2015- 2h58	0,17
Potência reversa 2° estágio	18/9/2015- 0h23	18/9/2015- 1h02	0,65
Potência reversa 2° estágio	18/9/2015- 21h42	18/9/2015- 22h14	0,53

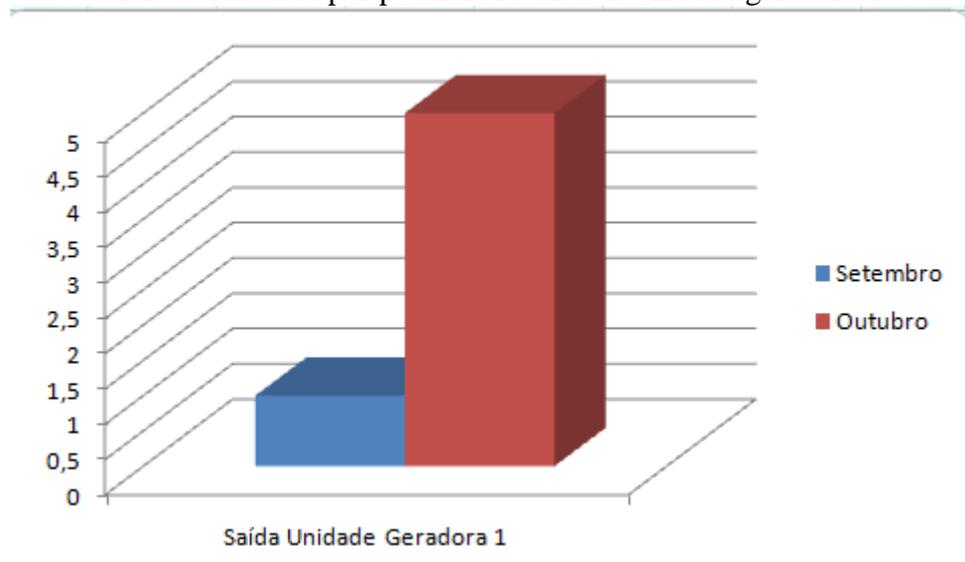
estágio			
Potência reversa 2º estágio	20/9/2015- 0h45	20/9/2015- 0h59	0,23
Potência reversa 2º estágio	21/9/2015- 0h02	21/9/2015- 0h28	0,43
Potência reversa 2º estágio	22/9/2015- 3h07	22/9/2015- 3h19	0,20
Potência reversa 2º estágio	23/9/2015- 9h22	23/9/2015- 9h34	0,20
Potência reversa 2º estágio	23/9/2015-11h03	23/9/2015- 11h26	0,38
Potência reversa 2º estágio	5/10/2015- 2h06	5/10/2015- 2h25	0,32
Potência reversa 2º estágio	13/10/2015- 11h07	13/10/2015 11h14	0,12
Potência reversa 2º estágio	23/10/2015-15h44	23/10/2015-15h50	0,10

Fonte: Relatório O & M da CGH Ponte Queimada

Por meio dos dados, é possível observar que com o passar do tempo, este tipo de problema passou a ocorrer com mais frequência, inclusive há casos em que foram registradas até mesmo três ocorrências no mesmo dia. Além disso, é possível notar que, em sua maioria, acontecem à noite ou madrugada, horários em que operador, geralmente, está mais displicente e pode ser acometido a fatores humanos e até mesmo fisiológicos, como o sono.

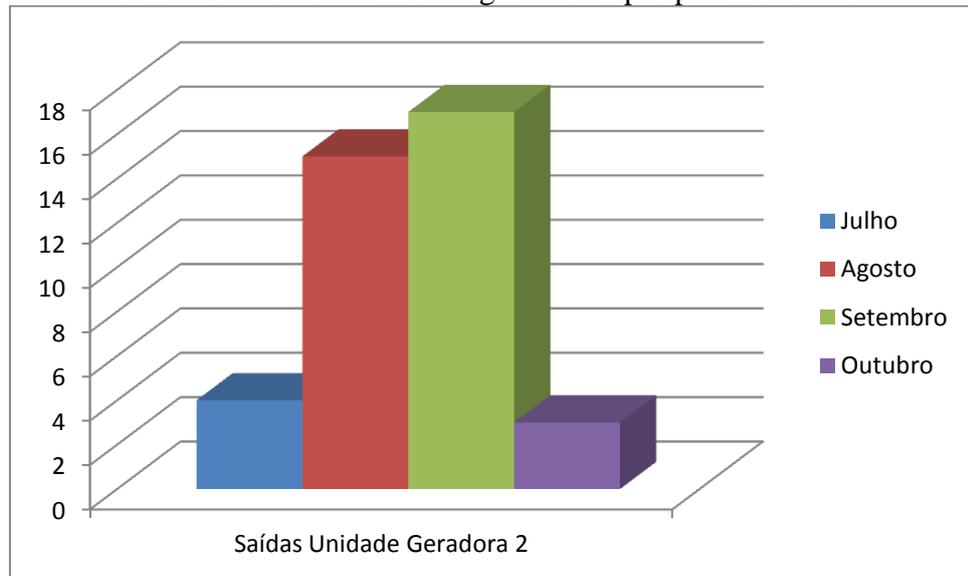
As saídas por potência reversa ocorreram na unidade geradora 1 somente nos meses de setembro e outubro, conforme ilustra o gráfico 1:

Gráfico 1: Saídas por potência reversa na unidade geradora 1



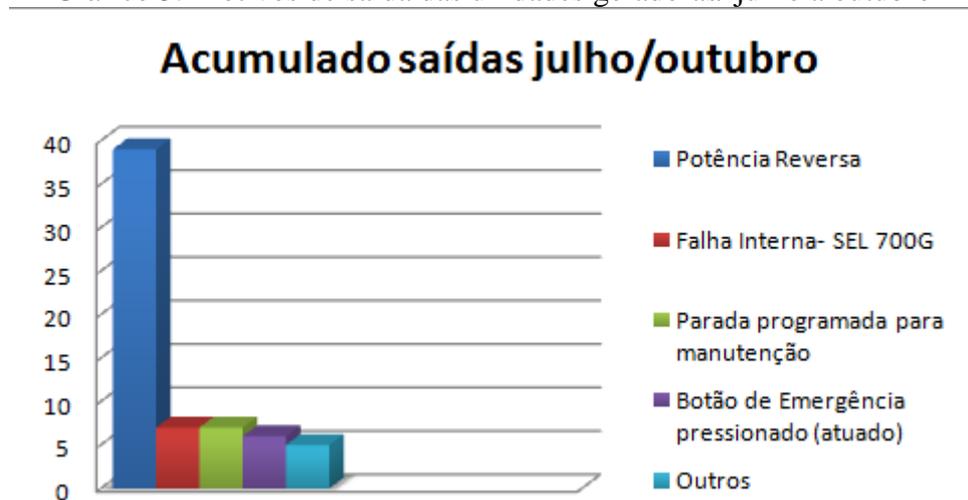
De julho a outubro de 2015, as saídas por potência reversa na unidade geradora 2 somaram 39 ocorrências. O mês de setembro registrou o maior número delas (17).

Gráfico 2: Saídas da unidade geradora 2 por potência reversa



Somadas, considerando que em junho não houve saídas por potência reversa; de julho a outubro de 2015, este foi o principal motivo da saída das unidades geradoras. Em seguida, dentre os cinco principais motivos, estão falha interna- SEL 700G (relé de proteção multifunção, que atua na proteção, controle e monitoramento de geradores), parada programada para manutenção, botão de emergência pressionado (atuado) e outros.

Gráfico 3: Motivos de saída das unidades geradoras/ julho a outubro



### 3.3 PROJETO

A tarefa inicial foi identificar as variáveis da programação das unidades geradoras da usina, de modo a tratá-las e acrescentar outras para o controle automático da usina. O projeto

foi programado em PLC através do software TPW- PCLINK da WEG, disponível de maneira gratuita (free) para download através do site da empresa.

Antes de a unidade geradora entrar no sistema, o regulador de velocidade trabalha em modo de regulação de velocidade controlando a frequência do gerador. Após a unidade ser sincronizada, esta passa a trabalhar em regime de potência, ou seja, nas mesmas saídas digitais que dão pulsos aumentar/diminuir frequência passam a aumentar e diminuir potência.

Na linha 1 (Figura 16), quando o disjuntor fecha, a variável M24 sinaliza disjuntor fechado, ou seja essa é uma pré-condição para o início do processo de controle de geração automático. Por sua vez, M424 representa a retirada da carga, ou seja, quando o operador pedir para desligar a unidade no processo de parada da unidade, essa variável irá abrir o circuito de controle, do contrário o operador vai tentar parar a máquina e o controle de geração vai ficar dando pulsos de aumenta/diminui potência.

Inserimos a variável X130, entrada digital que habilita ou desabilita o controle, controlado por uma botoeira no painel com a nomenclatura manual/automático, ou seja, controle de potência manual ou automático. Esse elemento foi inserido para que caso o operador precise desligar o controle de geração automático, seja por motivo de falha, ou de manutenção preventiva, ou até mesmo para verificação de teste em determinada potência. Também foi inserida a variável M1002, que verifica se houve falha no controle de nível.

Na ponta está o temporizador T198, considerando que a base de tempo do temporizador é de 100ms, escolhemos o tempo de contagem pré-definido pela constante k em 6 minutos, o que corresponde a 360 segundos, o que multiplicando pela base fica em 3600 segundos.

Figura 16: Linha 1- Programação controle de geração



Fonte: Próprio autor<sup>60</sup>

Já na segunda linha (Figura 17), após a contagem do temporizador T198, este fecha seu contato, onde se inicia a comparação do nível montante com a variável de tratamento de dados D260. A empresa trabalha com nível montante na escala de centímetros, considerando 12,5 cm como ideal e uma faixa de tolerância de até 13,5 cm. Mas se o nível baixar de 12,5 cm terá de diminuir a geração para voltar a estabilizar o sistema e se passar de 13,5 cm estará

<sup>60</sup>Fonte: Próprio autor

perdendo geração. Optamos por trabalhar com a programação na escala de milímetros para uma melhor parametrização da variação.

Figura 17: Linha 2- Programação controle de geração



Fonte: Próprio autor<sup>61</sup>

Conseqüentemente, na terceira linha (Figura 18), quando a variável de tratamento for menor que 125 mm, fecha M1000, que dá um pulso para M603 (variável que diminui potência).

Figura 18: Linha 3- Programação controle de geração



Fonte: Próprio autor<sup>62</sup>

Na quarta linha (Figura 19), após o pulso, aciona RST, o temporizador T198, que reseta o sistema, fazendo a contagem do tempo de 6 minutos, tempo estimulado para o processo, que pode ser definido de acordo com conhecimento empírico de campo. Ele foi verificado fazendo testes de tempo/reposta do nível montante.

Figura 19: Linha 4- Programação controle de geração



Fonte: Próprio autor<sup>63</sup>

A linha 5 (Figura 20) é a continuação do processo  $D260 < 125$ . O processo de diminuir potência não fará nada, sendo que o PLC continuará lendo os processos nas linhas abaixo. Neste ponto temos exatamente as mesmas variáveis do 1º processo, a única diferença é que está atuando no temporizador T199, que é o do comparador de aumento de geração.

Figura 20: Linha 5- Programação controle de geração



Fonte: Próprio autor<sup>64</sup>

Após feito o tempo de contagem, este iniciará seu contato na linha 6 (Figura 21) ativando o comparador:

<sup>61</sup>Fonte: Próprio autor

<sup>62</sup>Fonte: Próprio autor

<sup>63</sup>Fonte: Próprio autor

<sup>64</sup>Fonte: Próprio autor

Figura 21: Linha 6- Programação controle de geração



Fonte: Próprio autor

Este irá comparar (linha 7) e caso  $D260 > 135$ , então ativará a memória M1001 que fechará seu contato na linha de baixo acionando a saída M604 (aumenta potência):

Figura 22: Linha 7- Programação controle de geração



Fonte: Próprio autor<sup>65</sup>

Após esse comando, o T199 fechará o contato de reset na linha abaixo (Figura 23), lembrando que o PLC faz a leitura de cima pra baixo da esquerda para a direita. Após esse reset o sistema iniciará novamente a contagem de tempo. E por último temos a variável de falha, que faz a verificação da queda do NM.

Figura 23: Linha 8- Programação controle de geração



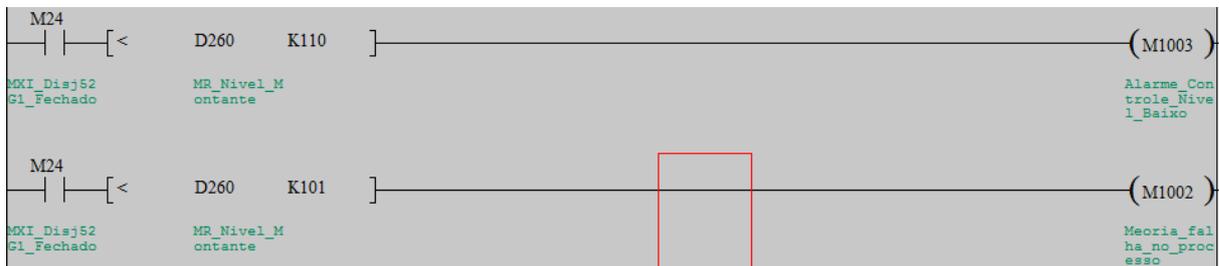
Fonte: Próprio autor

Na penúltima linha (Figura 24), M24 novamente indica disjuntor fechado, realizando a comparação do nível montante em D260. Caso o NM chegue a 110 ocorrerá o acionamento da M1003 que enviará um comando para a IHM subindo o alarme de Nível Montante Baixo.

Na ultima linha, temos o M24, que novamente indica disjuntor fechado, realizando a comparação do nível montante em D260. Sendo menor do que 101, a variável M1002 é ativada, abrindo e cancelando o circuito de comando, pois o NM nunca pode chegar a menos de 100, pois caso chegue pode ter havido falha no controle de geração. Quando o sensor queima fica em 0 e se cair para menos de 100 significa muito pouca água no rio, uma seca atípica semelhante a ocorrida neste ano de 2015. Esta manda sinal para a Interface Homem-Máquina (IHM), fechando T199, que contará o tempo que irá setar a M35, e essa acionará a Word M4515 que é endereçada na IHM e subirá um alarme de falha no controle de geração da unidade geradora.

<sup>65</sup> Fonte: Próprio autor

Figura 24: Linha 9- Programação controle de geração



Fonte: Próprio autor<sup>66</sup>

Após o técnico ter se deslocado até a usina e resolvido o problema, basta que resete os alarmes na IHM que o mesmo sumirá e iniciará novamente o processo de controle de geração.

A variável que resete os alarme é a M400.

Tais variáveis estão resumidas a seguir:

#### **Variáveis de Comando**

M404 - Aumenta Potência botão IHM

M504 - Aumenta Potência pelo SDSC

M604 – Aumenta Potência pelo CGN

M403 - Diminui Potência Botão IHM

M503 - Diminui Potência pelo SDSC

M603 - Diminui Potência pelo CGN

X130 – Comando de Habilita/Desabilita CGN

#### **Memórias de Proteção**

M424 - ZERA A CARGA

M24 - Disjuntor Fechado

M1002 – Memória de proteção quanto a NM menor que 101 mm

M1003 – Memória de alarme de Nível montante baixo

#### **Variáveis de Tratamento de Dados**

D260 - Tratamento de dados NM ( conversão de analógico para digital)

<sup>66</sup>Fonte: Próprio autor

## Alarmes

M211 – Alarme sonoro

M400 – RECONHECE OS ALARMES

## Entradas Digitais

X130 – HABILITA/DESABILITA CONTROLE

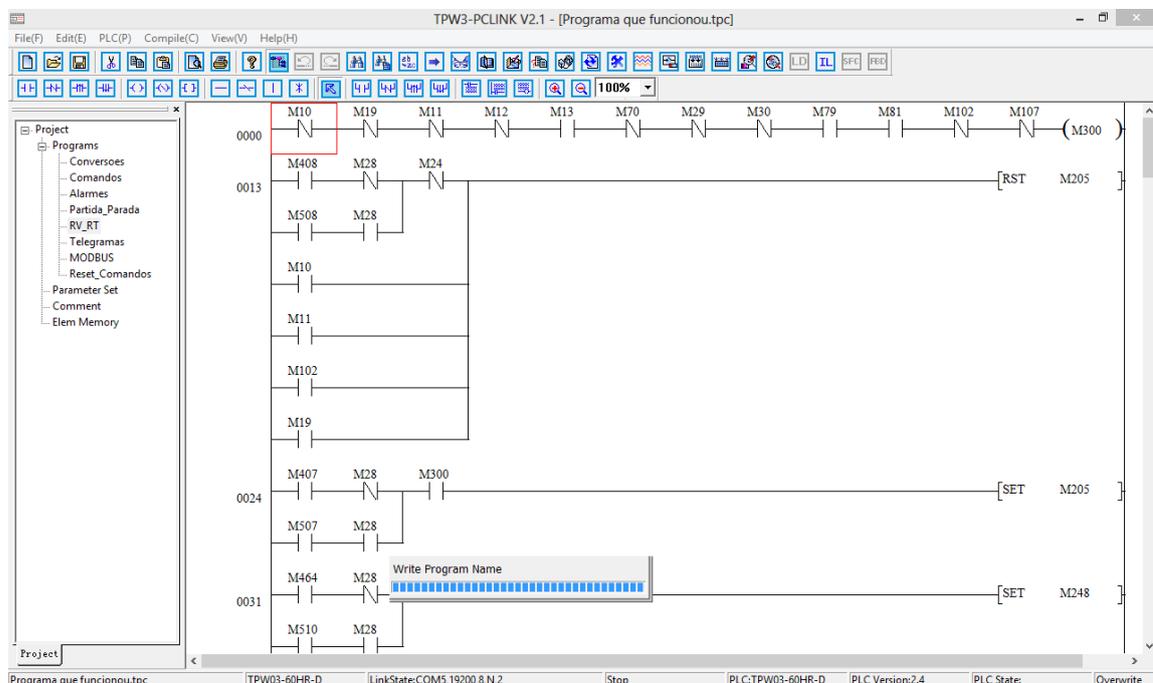
### 3.3.1 Testes realizados

#### Teste para identificação das variáveis e principais erros encontrados

O primeiro teste foi de identificação das variáveis, com base na lógica da usina, tais como, qual aciona para aumentar ou diminuir potência, a memória para aumentar e diminuir potência, saída digital e entradas do PLC; e variável de tratamento de medição do nível montante.

De posse destas informações, demos início aos testes na programação. A Figura 25 representa o primeiro procedimento. Cada vez que finalizo uma programação, tenho de fazer o uploading para o PLC. Não se consegue alterar o processo diretamente nele, tem de se baixar a programação, escrevê-la e depois enviá-la a toda novamente.

Figura 25: Uploading no PLC

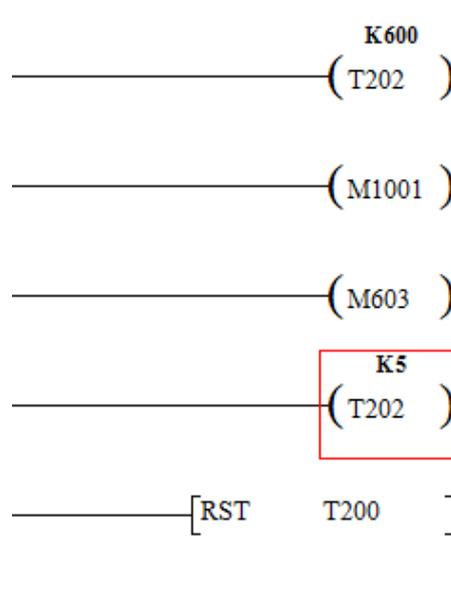


Fonte: Próprio autor<sup>67</sup>

<sup>67</sup>Fonte: Próprio autor

Realizando a primeira simulação, observamos uma falha na saída de potência, ficando ativa constantemente. Identificamos que havia um erro de programação, conforme a Figura 26, pois cada comparador tem um temporizador próprio, logo quando fizemos, colocamos o RST resetando outro temporizador que não estava no processo (T 200), ocasionando erro e não fazendo a checagem correta.

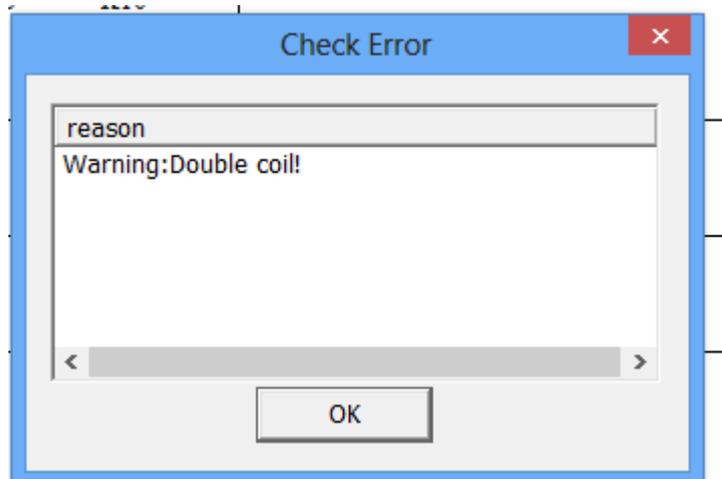
Figura 26: Erro- RST resetando o temporizador T200, que não faz parte do processo



Fonte: Próprio autor<sup>68</sup>

Em seguida, deparamo-nos com um novo erro. Ao tentar fazer o processo, foram colocadas duas memórias iguais (Figura 27) sendo acionadas por sinais diferentes. Isso ocasionou um erro, pois não pode se acionar duas memórias por sinais diferentes.

Figura 27: Erro- DoubleCoil: Duas memórias iguais

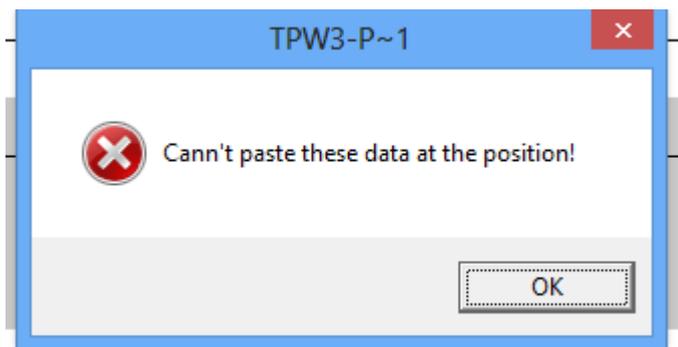


Fonte: Próprio autor<sup>69</sup>

<sup>68</sup>Fonte: Próprio autor

Após conseguirmos efetuar a primeira programação de forma isolada no PLC, procedemos para copiar e colar o arquivo na programação da unidade geradora 1 da usina, porém, surgiu outro erro, desta vez, ocasionado devido a termos selecionando um modelo diferente do PLC da CGH, que é o modelo 60HR-D. No momento da programação ilhada utilizamos o 20HR-D (Figura 28).

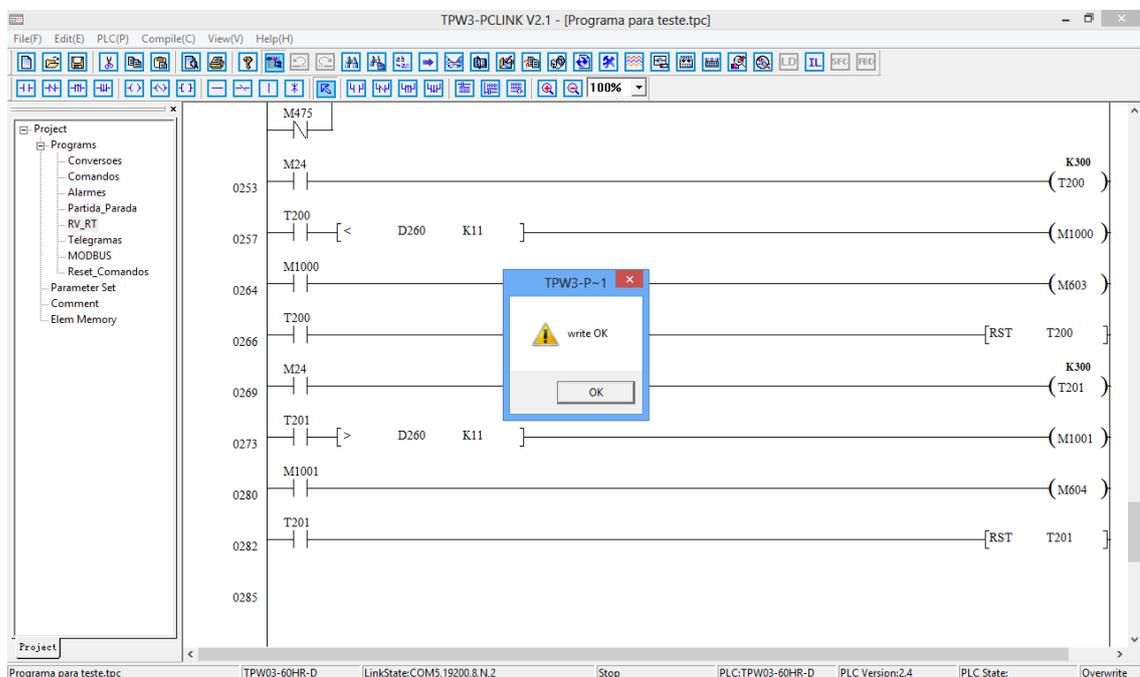
Figura 28: Erro- Modelo de PLC da programação ilhada diferente do utilizado pela usina em estudo



Fonte: Próprio autor<sup>70</sup>

Corrigidos os erros acima mencionados, finalmente conseguimos o primeiro processo de escrita finalizado com sucesso (Figura 29).

Figura 29: Aviso de processo devidamente finalizado



Fonte: Próprio autor<sup>71</sup>

<sup>69</sup>Fonte: Próprio autor

<sup>70</sup>Fonte: Próprio autor

### **Primeiro teste de controle**

Após a máquina ser sincronizada, sua potência subiu para 50 KW automaticamente de acordo com o set point próprio do Regulador de Velocidade. A princípio achamos que o controle estava sendo feito de maneira automática, porém, verificamos que a variável estava errada, uma vez que a medição de nível montante (NM) estava com indicação 0,11; o que gerou um erro, pois o PLC considera apenas números inteiros, e mesmo com o PLC trabalhando on-line, na variável D260 o NM ficava em 0. Assim, verificamos outro erro, pois se estava em 0 não deveria subir a potência, mas abaixar. Logo, fomos checar na programação e a memória de saída estava trocada. Após efetuarmos a troca foi resolvido o problema da variável, que não elevou mais a potência, começando a reduzi-la, porém, ainda continuávamos com o erro da variável de comparação do PLC.

A programação consistia em variável > 135 - sobe potência, variável < 125 - abaixa potência. Mas, como o PLC estava pré-programado na faixa para sair o valor de 0,11 a 0,9; então o nível sempre estava abaixo, reduzindo a potência até que a unidade geradora saía por perda de pressão, que é justamente o mal que queremos evitar.

Deste modo, procedemos com o teste com o temporizador T200 para a contagem de seis segundos. No entanto, ficou dando muitos pulsos, portanto, não deu tempo de resposta suficiente. Subia a potência tão rápido que não dava tempo para saber se o nível montante iria ou não manter.

### **Segundo teste de controle**

Por isso, estipulamos um tempo maior, de 15 segundos e ‘setamos’ o nível montante em uma casa que o PLC pudesse trabalhar. Modificamos na lógica programada o temporizador T200 para a contagem de tempo de 15 segundos. Atingindo esse tempo, a saída digital do relé KA104 foi acionada aumentando a potência da máquina, que estava em 155 kW. Aguardando a sequência de pulsos, foi possível observar que a máquina foi para 163 kW. Teste foi efetuado com sucesso e decidiu-se aumentar a temporização para o próximo teste, desta vez, já visando um tempo de acordo para o sistema.

### **Teste de campo**

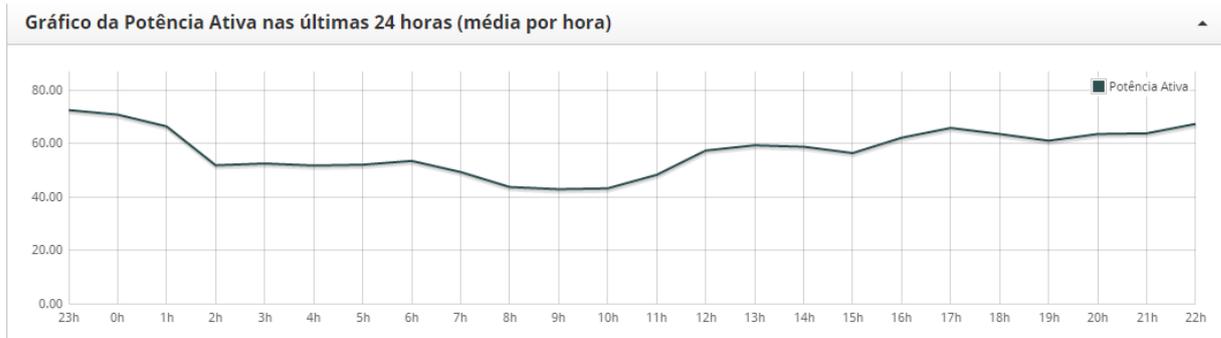
Após os testes de variáveis e controle terem respondido positivamente, partimos para testes de campo para definir qual seria o melhor tempo para um controle ideal do NM, esse tempo ficou definido em 6 minutos, que é um tempo ideal para controle e tempo de resposta do NM.

---

<sup>71</sup>Fonte: Próprio autor

Deixamos a UG rodando durante um período de 24 horas com o controle de geração ativo, o que resultou numa melhora do resultado de controle de geração. O sistema foi implantado na CGH Ponte Queimada no dia 14 de novembro de 2015. O resultado é ilustrado pelo gráfico 4.

Gráfico 4: Registro da potência ativa após controle de geração implantado



### 3.3.2 Telas da IHM e mudanças no painel

O controle funcionou corretamente, mas temos de nos atentar quanto a possíveis falhas no sistema. Logo, implantamos um comparador para verificar quando o nível montante chegasse ao nível crítico (110) subindo um alarme na IHM/COR com a nomenclatura de Nível Montante baixo.

Deste modo foram realizados dois testes de falhas, um em que desligamos a alimentação do sensor, que foi para 0, logo, o controle iria ficar diminuindo a potência, mesmo com água no rio. Então, fizemos um terceiro comparador, de modo a verificar que quando o NM está abaixo de 101 milímetros, este deverá abrir o circuito de controle automático, desligando-o, ao mesmo tempo em que acionará o alarme de falha no controle automático de geração, tanto no painel quanto no COR e acenderá também um LED laranja de falha no controle no painel. Logo, o COR ligará para o técnico responsável que irá à usina verificar quanto ao funcionamento do sensor.

Figura 30: Botoeira para habilitar ou desabilitar função de comando automático foi instalada



Fonte: Próprio autor<sup>72</sup>

Figura 31: Painel antes de instalação do LED de falha no controle



Fonte: Próprio autor<sup>73</sup>

Outra hipótese seria uma estiagem atípica como a ocorrida esse ano em alguns locais do Brasil, em que o nível do rio caiu a tal ponto que a máquina não conseguiu ficar no sistema e que, teoricamente, o NM ficaria abaixo de 120.

E a última hipótese seria caso a máquina tivesse alguma restrição de geração, por exemplo, não pudesse passar de 50% da carga. Tem-se no painel a botoeira de automático/manual, que habilita o controle de geração tanto manual quanto automático.

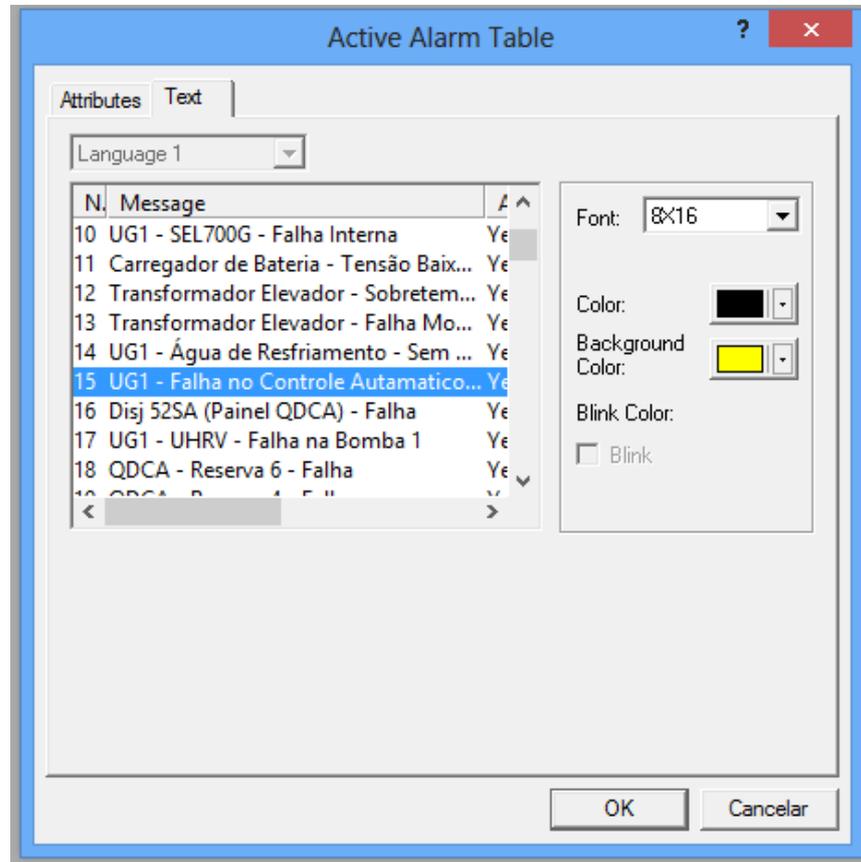
---

<sup>72</sup>Fonte: Próprio autor

<sup>73</sup>Fonte: Próprio autor

Fizemos as alterações de telas da IHM, através do programa ADP da WEG (gratuito) que permite fazer a programação necessária, como se pode ver na figura 32, em que usamos um alarme reserva pré- configurado.

Figura 32: Configuração do alarme



Fonte: Próprio autor<sup>74</sup>

Figura 33: Alarme Controle de geração Nível baixo



Fonte: Próprio Autor<sup>75</sup>

<sup>74</sup>Fonte: Próprio autor

<sup>75</sup>Fonte: Próprio Autor

Figura 34: Falha no controle automático de geração já configurado

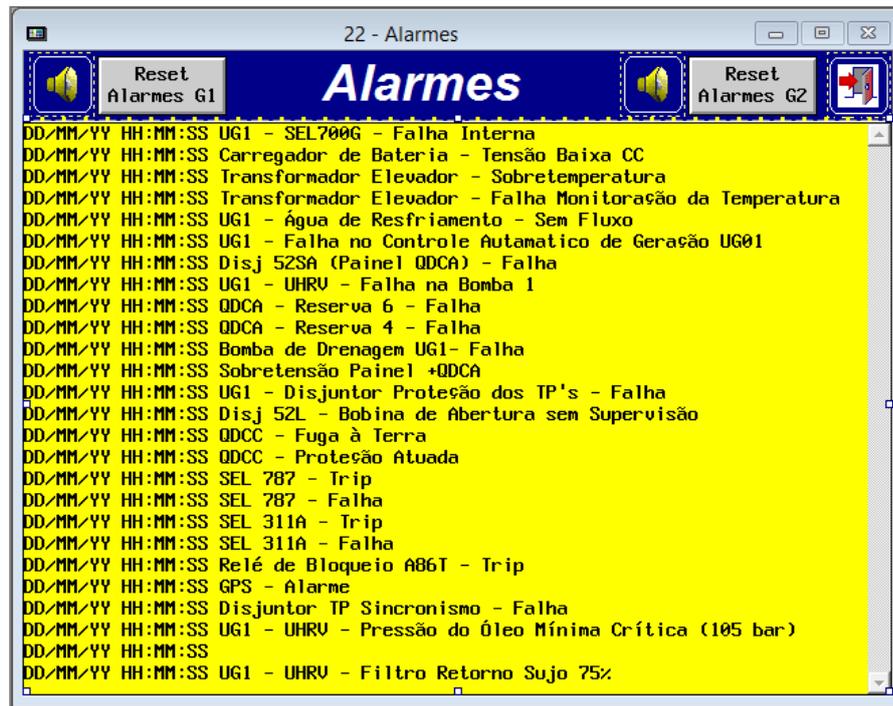
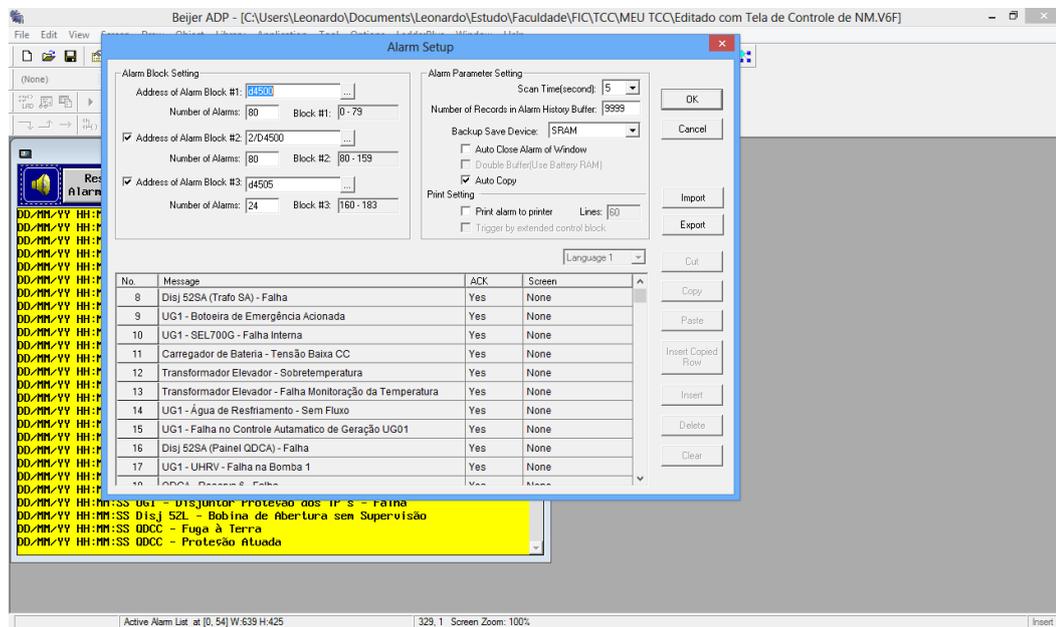
Fonte: Próprio autor<sup>76</sup>

Figura 35: Tela do ADP para criação da tela de alarme

Fonte: Próprio autor<sup>77</sup><sup>76</sup>Fonte: Próprio autor<sup>77</sup>Fonte: Próprio autor

### 3.4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Como parte do estudo de caso, monitoramos o registro da potência ativa da usina, observados antes da implantação do sistema, de pelo menos um dia de cada mês de operação. É possível observar uma oscilação tremenda da geração em função do nível e um sobe/abaixa a todo o momento. O operador ficava dando pulsos seguidos manualmente, na tentativa de regular a potência de acordo com a vazão, tendo em vista uma mudança repentina do nível.

Gráfico 5: Junho

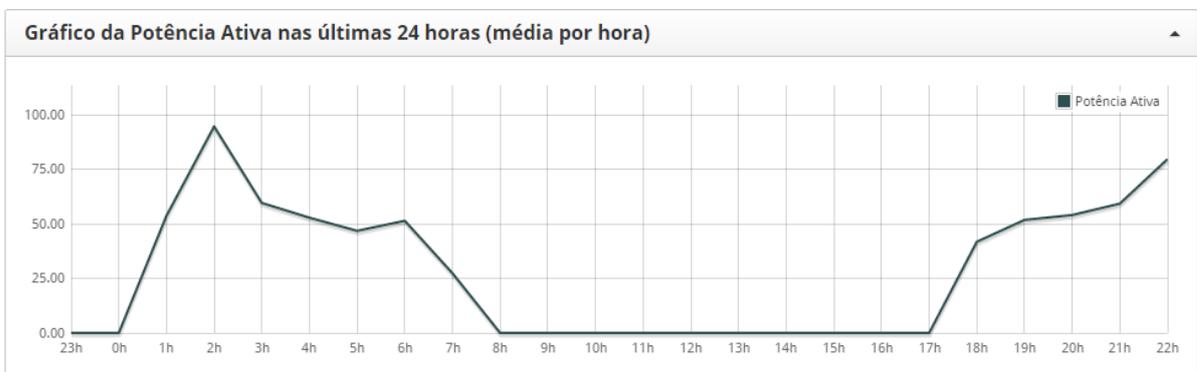


Gráfico 6: Julho



Gráfico 7: Agosto



Gráfico 8: Setembro



Após a implantação do sistema do controle de geração, também monitoramos os gráficos de potência ativa e foi possível perceber as mudanças através dos gráficos a seguir. Os valores de potência já não apresentam mudanças tão acentuadas, pelo contrário, uma certa estabilização. Não há variações bruscas da potência gerando gráficos mais uniformes.

Gráfico 9: 16 de novembro de 2015

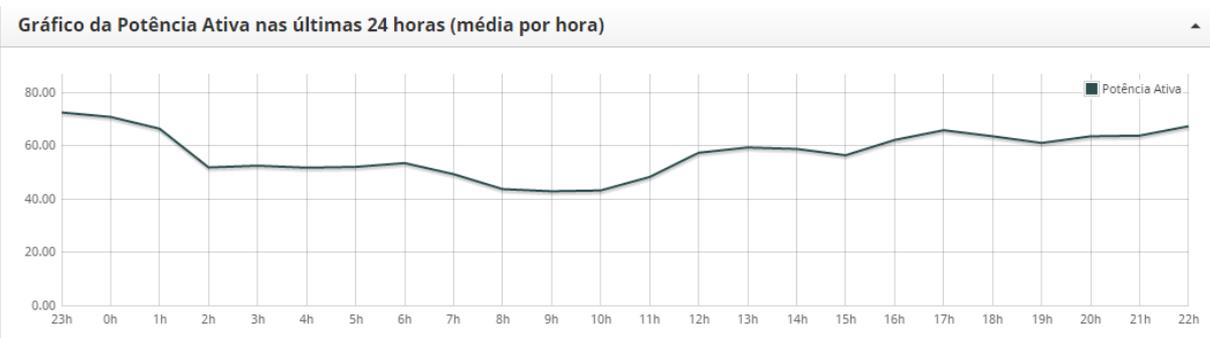


Gráfico 10: 17 de novembro de 2015

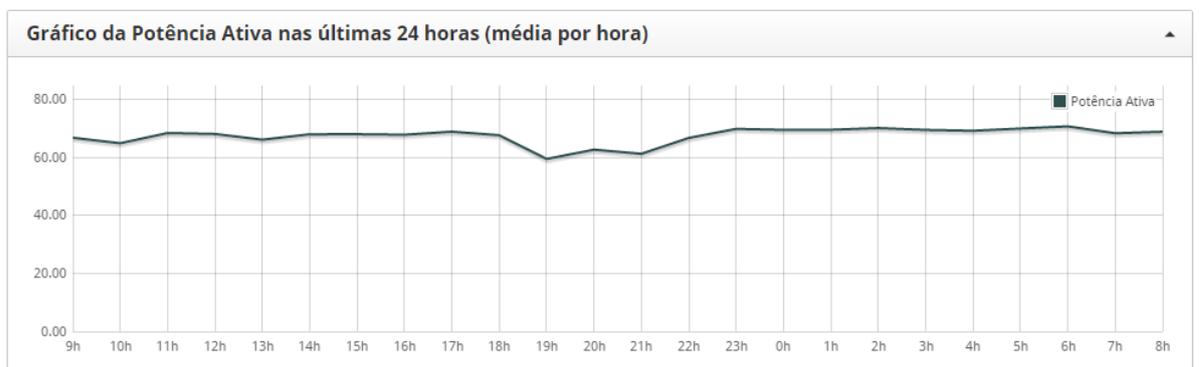


Gráfico 11: 18 de novembro de 2015

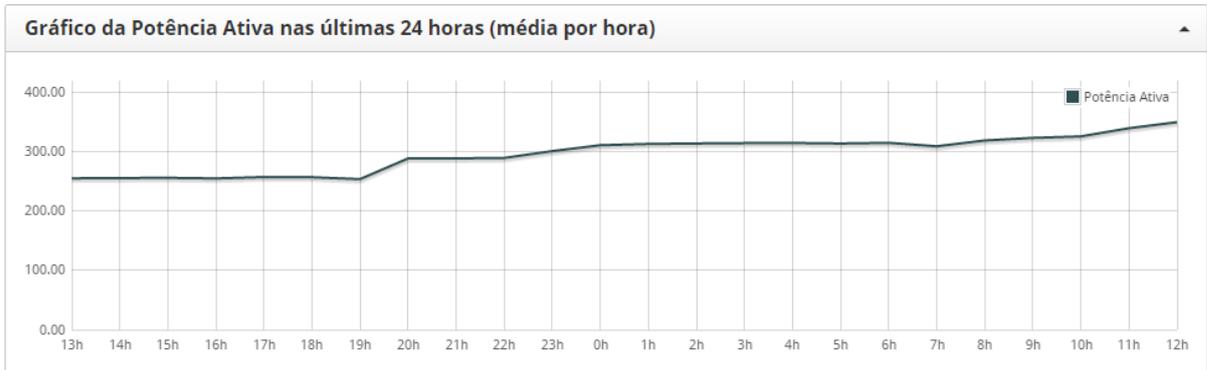
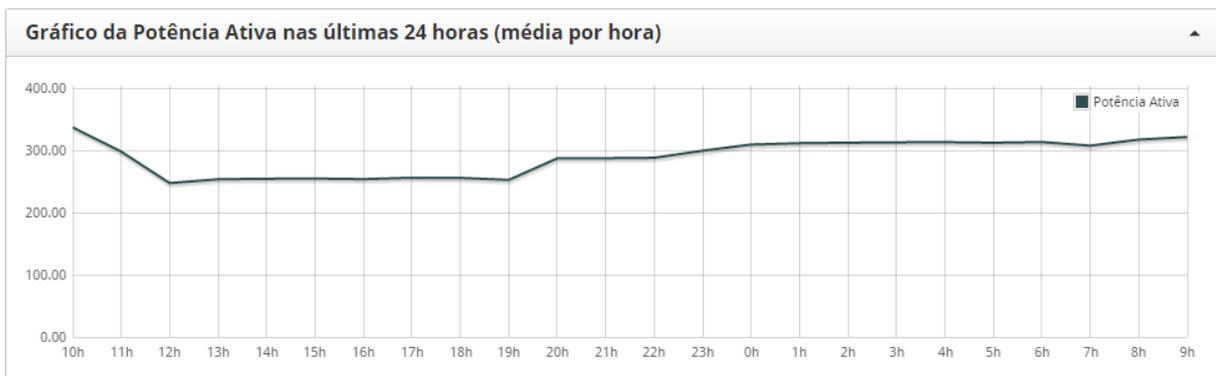


Gráfico 12: 19 de novembro de 2015



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo aprimorar o sistema de controle de geração da CGH Ponte Queimada de maneira automatizada, de modo a reduzir os índices de falhas do circuito, quando da displicência do operador, que realiza o monitoramento do nível montante manualmente, sendo que essa falha pode ser por vezes do operador ou simplesmente perda de comunicação com a usina, logo, mesmo sem comunicação a usina poderá se autocontrolar no quesito de geração até a chegada do técnico responsável.

Os objetivos foram alcançados, uma vez que foi possível confirmar que o controle de geração automático é viável, tanto do ponto de vista teórico, quanto prático, considerando que o projeto foi implantado com êxito na usina e já apresenta os primeiros resultados positivos. Os gráficos mostram que, de acordo com o proposto, após implantação do sistema não houve saída das unidades geradoras por potência reversa e o sistema respondeu de maneira bastante satisfatória convergindo para o conceito de eficiência e redução de falhas humanas, como proposto no início da pesquisa.

Portanto, os objetivos gerais e específicos foram cumpridos. A metodologia de pesquisa teve papel fundamental para estes resultados e a revisão de bibliografia também teve papel importante para esta pesquisa. Ao se fazer um estudo de caso, o primeiro passo é conhecer o ambiente que será estudado e esse objetivo foi cumprido através dos livros consultados. Na parte de programação, a bibliografia também teve papel crucial, além do acesso facilitado aos dados da usina, que permitiram um diagnóstico preciso do problema de pesquisa e conhecer a realidade da CGH Ponte Queimada.

Sendo assim, foi confirmada a hipótese de que ao se implantar um sistema de controle de nível montante por meio de um PLC, com referência em variáveis de um sensor ultrassônico de nível montante, pode-se efetuar um controle eficiente de geração, reduzindo-se as falhas humanas, consequentemente evitando o desperdício de água e reduzindo a indisponibilidade por potência reversa.

Para trabalhos futuros, sugerimos fazer uma modificação na IHM para o operador poder ‘setar’ a variável de controle de geração, tanto a de NM quanto habilita/desabilita pelo Centro de Operação Remoto, visando assim uma automação da usina e que seja desnecessária a ida imediata do técnico a usina para desabilitar essa função no painel.

Também sugerimos a implantação de um segundo sensor de NM para se fazer a comparação entre eles e de acordo com a diferença atestar a medição de NM, além de inserir na IHM o valor de NM desejado e do tempo de verificação de NM para o controle.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 06445- Turbinas hidráulicas, turbinas-bombas e bombas de acumulação**, 2001

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil) (ANEEL). **Banco de Informações de Geração: BIG**. Disponível em: < [www.aneel.gov.br/15.htm](http://www.aneel.gov.br/15.htm) >. Acesso em: 31 maio 2005.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 2 ed. Rio de Janeiro: LT

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, 2002.

BOLTON, W. **Mecatrônica: Uma Abordagem Multidisciplinar**. 4.ed. Porto Alegre: Bookman. 2010

DUNN, W. C. **Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos**. Porto Alegre: Bookman, 2013

ELETROBRÁS. **Diretrizes para Estudo e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. ANEEL, 2000

ENDERLEIN, R. **Microeletrônica: Uma Introdução ao Universo dos Microchips, seu Funcionamento, Fabricação e Aplicações**. EDUSP, 1994.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006

FRANCHI, Claiton Moro; CAMARGO, Valter Luis Arlindo de. **Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos**. São Paulo: Érica, 2008

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia - VIM.** Versão brasileira do "Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology". Rio de Janeiro: INMETRO, 1995

LATHI, B.P. **Sinais e Sistemas Lineares.** Tradução de Gustavo Guimarães Parma. 2. ed. Porto Alegre: Book-man, 2007

MEDEIROS FILHO, Solon de. **Fundamentos de medidas elétricas.** 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1981

MEDEIROS, J. C. O. **Princípios de telecomunicações: teoria e prática.** São Paulo: Editora Érica, 2004

NISE, Norman S. **Engenharia de Sistemas de Controle.** 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno,** Prentice Hall do Brasil, 4.ed. Rio de Janeiro, RJ, 2003

OKHEIM, Roger L. **Fundamentos de Eletrônica Digital - Vol.2: Sistemas Sequenciais-** McGraw-Hill, 2013.

ORDONEZ, Edward D. M.; PENTEADO, Cesar G.; SILVA, Alexandre C.R. **Microcontroladores e FPGAs- Aplicações em Automação.** 1 ed. São Paulo: Novatec, 2006.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Projeto de Usinas Hidrelétricas: Passo a Passo.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015

PETRUZELLA, Frank. **Controladores lógicos programáveis.** 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2010.

PRUDENTE, F. **Automação Industrial – PLC – Programação e Instalação.** Ed. LTC. 2010.

RIBEIRO, Marco Antônio. **Instrumentação**. 9. ed. Salvador, 1999. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAejlcAA/instrumentacao-marco-antonio-ribeiro>>.

Acesso em: 5/10/2015

ROSÁRIO, João Maurício. **Automação Industrial**. São Paulo, Baraúna – 2009

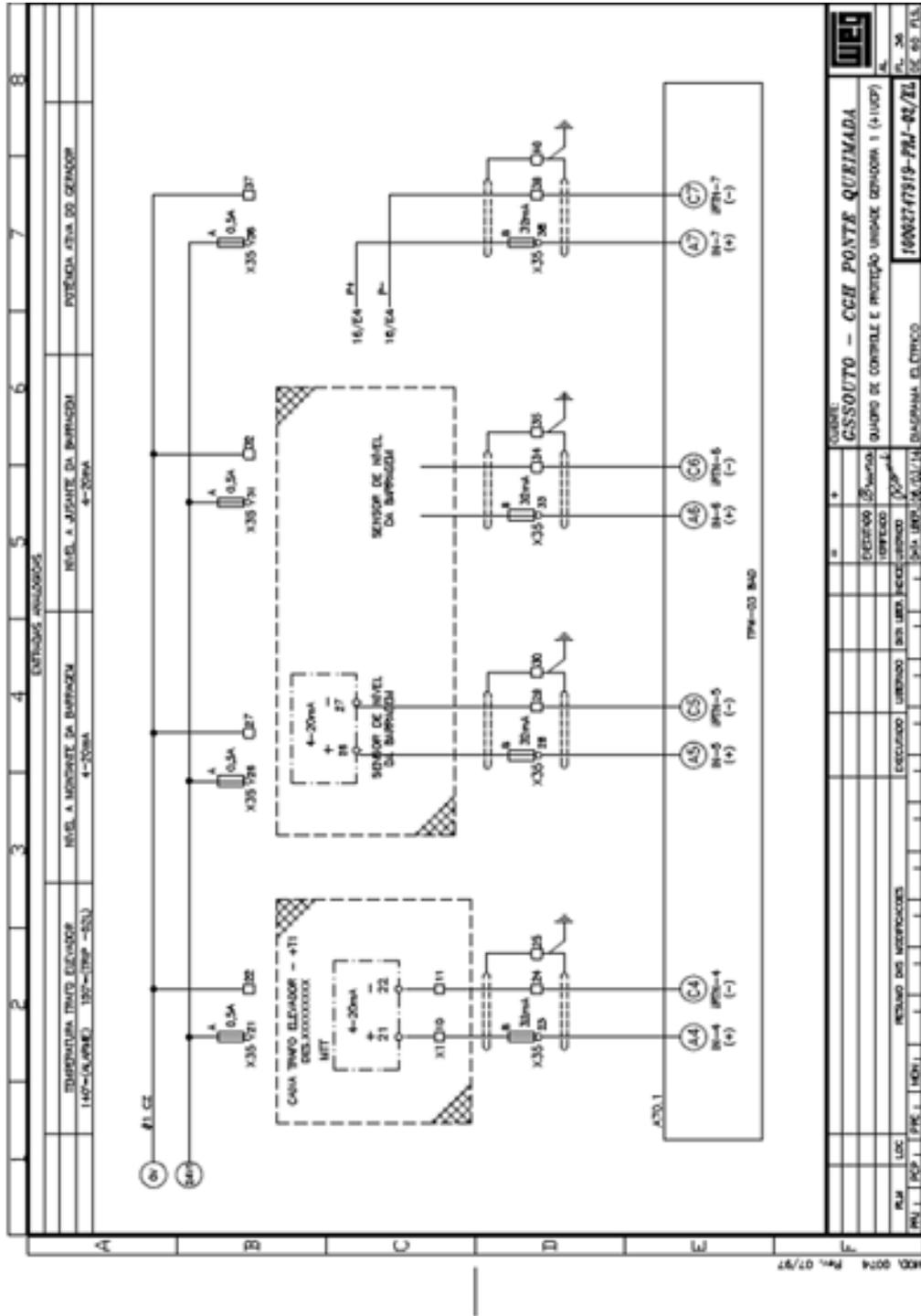
SILVEIRA, Paulo Rogério da; SANTOS, Winderson E. dos. **Automação e controle discreto**. 9.ed.reimpr. São Paulo: Érica, 2013

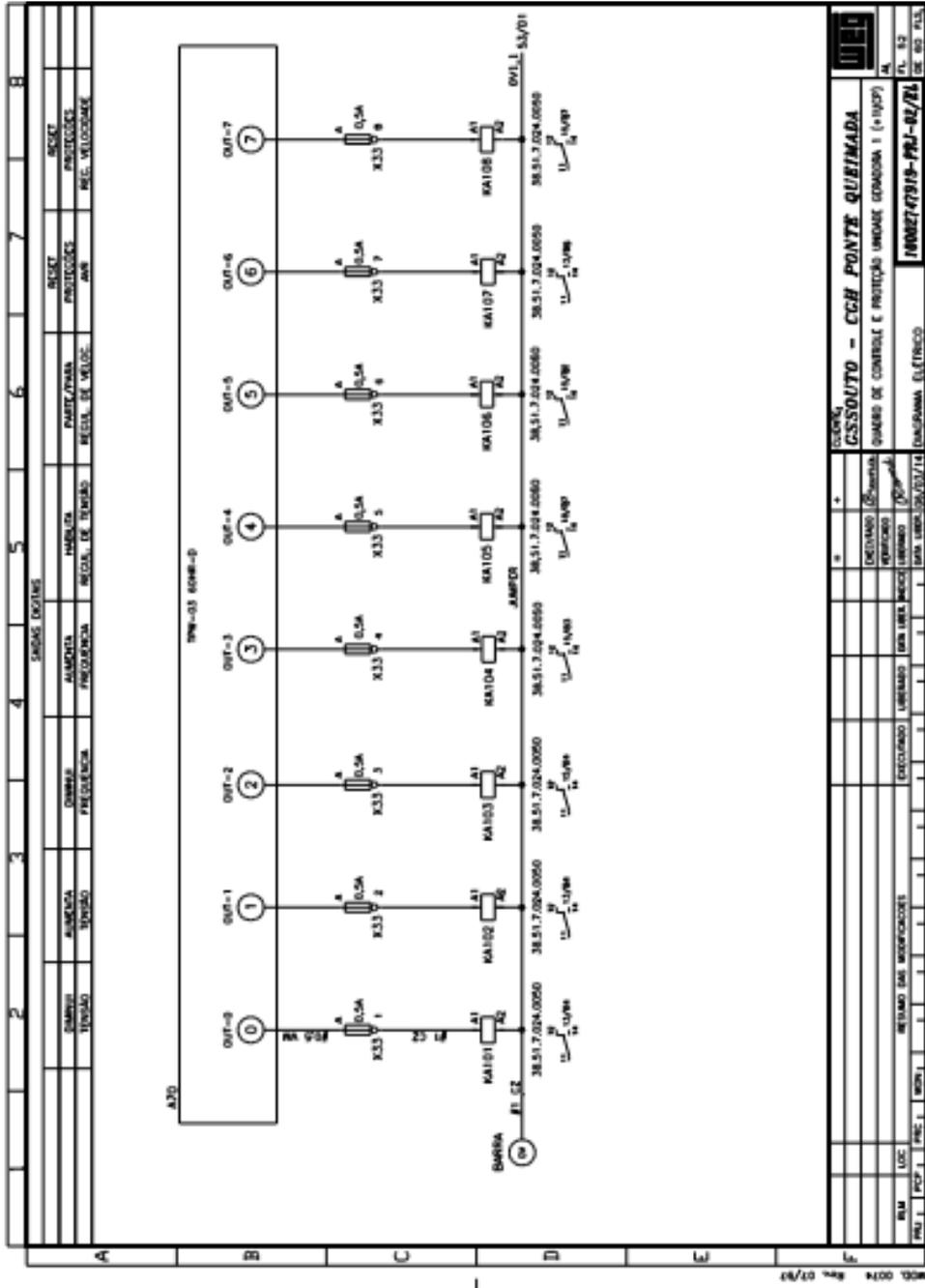
THOMAZINI, Daniel. ALBUQUERQUE, Pedro U. B. **Sensores Industriais- Fundamentos e Aplicações**. 5.ed. São Paulo: Érica, 2005

TOKHEIM, Roger L. **Fundamentos de Eletrônica Digital - Vol.2: Sistemas Sequenciais**- McGraw-Hill, 2013

TOOLEY, Mike. **Circuitos eletrônicos– Fundamentos e Aplicações**. Tradução Luis Cláudio de Queiroz Faria. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007

ANEXOS





Pulsos diminui/aumenta frequência