



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH 26
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

APLICAÇÃO DE REGULADORES INTEGRADOS DE TENSÃO E VELOCIDADE

**Ângelo Mibielli * Leonardo Augusto Weiss Stanley Siqueira Prates Roger Ferreira Suruagy
Ciro Borges Karia Moacir Fassina Junior Fernando Amorim Silveira**

REIVAX AUTOMAÇÃO E CONTROLE e ENDESA CACHOEIRA

RESUMO

A tecnologia digital começou a ser aplicada no Brasil, em Reguladores de Velocidade e Reguladores de Tensão, no início da década passada. Já no final da mesma década, apareceram as primeiras aplicações de Regulador de Tensão e Velocidade integrados e otimizados em um mesmo e único processador.

O presente artigo mostra a aplicação de Reguladores Integrados de Tensão e Velocidade nas Unidades Geradoras do complexo hidrelétrico de Cachoeira Dourada, pertencente ao grupo espanhol ENDESA.

Este complexo é formado por turbinas tipo Kaplan e Francis, em um conjunto de casas de força na mesma barragem, localizada entre os estados de Minas Gerais e Goiás, com unidades geradoras de vários tamanhos (2 x 17 MW, 3 x 54 MW, 3 x 84MW e 2 x 105 MW), num total de 658 MW.

Tecnicamente, o trabalho atesta as boas performances de regulação de tensão e de velocidade, em atendimento às normas pertinentes IEC e IEEE (Por exemplo: IEC 60308, IEC 61362, IEEE 421), e aos critérios operativos exigidos pelo Operador Nacional do Sistema – ONS.

Esta comprovação é feita através de registros gráficos, obtidos pelo mesmo processador do regulador integrado, seja durante ensaios de comissionamento, de identificação de parâmetros ou diante de perturbações operativas, quando o regulador integrado funciona também como um Registrador de Perturbações – RDP.

PALAVRAS-CHAVE

Reguladores, Integrado, Regulação, Tensão, Velocidade

1.0 - INTRODUÇÃO

Os sistemas de regulação de tensão e velocidade seguem um padrão que remonta ao tempo dos sistemas totalmente mecânicos, no qual a regulação de tensão e a regulação de velocidade eram sistemas totalmente distintos, padrão este que ainda perdura nos tempos atuais, a despeito das gigantescas mudanças tecnológicas que ocorreram.

A base para a integração do regulador de tensão e regulador de velocidade está no processamento digital, isso porque os sistemas hidráulico da turbina e de excitação do gerador são projetados conforme a capacidade de cada unidade geradora, independentemente da síntese do controle.

Um passo fundamental foi utilizar o mesmo processador digital para os dois reguladores, utilizando as mesmas plataformas de hardware e de software, permitindo assim a integração natural dos dois sistemas.

A rápida evolução da tecnologia digital na década de 90, com aumento da confiabilidade, aumento da capacidade de processamento, assim como o aumento da memória e da capacidade de armazenamento, contribuiu e consolidou cada vez mais tecnologias de controle digital, que trazia em seu bojo a incorporação de novas funcionalidades aos controladores.

A idéia de integrar os sistemas de regulação, não é a de unir os dois sob um mesmo gabinete, mas sim integrar e proporcionar uma otimização entre os sistemas de regulação, onde há pontos comuns a ambos os sistemas tais como a transdução de sinais, as entradas e saídas de sinais analógicos (sinais contínuos), bem como as entradas e saídas de sinais digitais (sinais discretos), que são compartilhadas.

Outro ponto importante é que o passo para integrar sistemas dentro do ambiente de geração de energia já foi dado no passado pelo Sistema de Proteção, no qual os imensos painéis existentes, com vários relés eletromecânicos, foram substituídos por relés de proteção multi-função digital, melhorando a confiabilidade e o desempenho dos antigos sistemas.

A integração de sistemas de regulação inicialmente proposta para pequenas centrais, chegou às grandes centrais, trazendo vantagens e ganhos a estes sistemas.

Este trabalho busca apresentar essa quebra de paradigma, substituindo a filosofia de aplicação separada de sistemas clássicos de regulação de tensão e velocidade, por sistemas integrados, sendo assim uma nova solução tecnológica com viabilidade econômica para centrais de grande, médio e pequeno porte.

Como exemplo apresentamos os resultados aplicados aos hidrogeradores da Usina de Cachoeira Dourada no município de mesmo nome, no estado de Goiás.

1.1 Evolução dos Sistemas de Regulação

A evolução dos sistemas de regulação desde que o homem começou a gerar a energia elétrica é apresentada abaixo como uma visão desta quebra de paradigma para os sistemas futuros.

Tabela 1 - Evolução dos Reguladores

EVOLUÇÃO	TIPO DE REGULADOR	DESCRIÇÃO
Primeiros Reguladores	Reguladores Mecânicos	Inicialmente foram implantados sistemas totalmente mecânicos, onde a operação era totalmente manual
	Reguladores Eletro-Mecânicos	Eram reguladores mecânicos com comandos elétricos incorporados permitindo assim a operação em uma sala de comando.
	Reguladores Analógicos	Na era do transistor, a eletrônica analógica permitiu um salto para facilitar os ajustes, que na época eram feitos em peças mecânicas. As placas eletrônicas foram amplamente utilizadas.
	Reguladores Digitais	Com a evolução da eletrônica digital, surgiram os primeiros reguladores que somente realizavam a função de regulação, substituindo as placas de eletrônica analógica.
	Sistemas Digitais de Regulação	Os sistemas digitais de regulação foram a evolução natural do sistema: o processador que era usado somente para uma função, passa a comandar periféricos
	Sistema Integrado de Regulação	Utilizando a mesma plataforma de processamento nos dois reguladores a integração foi um passo natural para os dois sistemas. Muda aqui o paradigma, os sistemas de regulação passam a ver a Unidade Geradora como um todo e não sistemas distintos de tensão e velocidade.
Estado atual da Evolução	Sistema Integrado de Regulação e Automação	A evolução para a incorporação da automação no sistema integrado de regulação de tensão e velocidade é o caminho natural, uma vez que estes mesmos sistemas já realizam funções de automatismo quando separados.

1.2 Opção tecnológica

O ponto fundamental que possibilitou a integração de sistemas foi a tecnologia. A utilização de processadores de 32 bits utilizando CPUs Pentium e memórias de grande capacidade foram pontos determinantes no processo de integração, assim como agregar funcionalidades de registro de sinais contínuos e discretos, bem como o registro de eventos. Uma vez integrados os sistemas de regulação de tensão e velocidade seu desempenho deve atender às mesmas exigências dos sistemas de regulação separados, seguindo os padrões definidos pelas normas internacionais para o setor elétrico. A definição de um processamento preemptivo, com determinação de prioridades e escalonamento de tarefas permite ao sistema processar tarefas de ação rápida como transdução de sinais em simultaneidade com tarefas de controle, supervisão, registro e comando, sem prejuízo a nenhuma das partes.

2.0 - APLICAÇÃO DO REGULADOR INTEGRADO

A aplicação de Sistemas Integrados de Regulação em Cachoeira Dourada iniciou em 2001 com a modernização das unidades geradoras 3 e 5 de 54 MW de potência, quando foram substituídos o regulador de tensão e o regulador de velocidade por somente um painel de regulador integrado de tensão e velocidade, uma inovação para a equipe de operação e manutenção da usina.

Na seqüência, a unidade 4 de 54MW e a unidade 8 de 84 MW – essa última, maior potência até então de um sistema com regulador integrado. Em seguida foram modernizadas as unidades 6 e 7 ambas de 84 MW e a unidade 1 de 17 MW. Em 2006 entra em operação o regulador integrado com a maior potência instalada, unidade 9 de 105 MW. O sistema integrado rompe a barreira das unidades de 100MW, um marco na evolução deste equipamento. A tabela abaixo apresenta as principais características da modernização das unidades geradoras de Cachoeira Dourada.

Tabela 2 - Características Atuais e Antigas

DISPOSITIVO	SISTEMA ORIGINAL	SISTEMA ATUAL
Controle e Regulação de Velocidade	Regulador de velocidade mecânico UG1 Mecânico Regulador Eletro-mecânico Analógico Regulador da UG9 Analógico	Regulador Integrado de tensão e Velocidade – Digital
Sistema Hidráulico - Características	Válvula Distribuidora pilotada por Regulador mecânico e realimentações mecânicas.	Modernização parcial com montagem de um piloto hidráulico sobre a válvula distribuidora através de um circuito hidráulico com válvulas de partida/parada, filtragem adequada, válvula proporcional OBE e realimentações eletrônicas.
Pressão Sistema Hidráulico	UG1 Pressão de 25 Kg UG3 a UG5 Pressão de 27 Kg UG6 a UG8 Pressão de 27 Kg UG9 Pressão de 60 kg	Mantida a mesma pressão de trabalho
Realimentação de Posição do Distribuidor	Feita por haste mecânica para o regulador mecânico 6, 7 e 8 Com sensor elétrico 9 Variômetro	Medição de Posição do Distribuidor através de transdutor eletrônico.
Realimentação de Posição da Roda Kaplan (*)	Feita por haste mecânica para o regulador mecânico	Medição de Posição da Roda Kaplan através de transdutor eletrônico.
Curva de Conjugação (*)	Realizado através de “came” mecânico e nível de barragem constante com alteração somente por mudança manual	Medido nível de montante e jusante e incorporado na malha de controle na curva de conjugação da unidade geradora
Controle e Regulação de Tensão	Reguladores eletrônicos	Regulador Integrado de tensão e Velocidade – Digital
Conversor de Potência	Ponte de Tiristores obsoleta com 24 Tiristores. UG3, UG4 e UG5 excitatriz rotativa;	Conversor Estático baseado em Ponte de Tiristores Redundante com Circuito de Proteção Crowbar Conversor de potência dimensionados para atender submódulo 3.8 ONS;

Pré Excitação	Pré excitação CC com contator de campo CC.	Pré excitação CA e CC redundantes
Realimentação de Potência	Transformador de excitação a óleo.	Transformador de excitação a seco, com proteção incorporada Transformadores dimensionados para atender submódulo 3.8 ONS (Exceto UG9 e UG10)

(*) Exceto as Unidades Geradoras UG6, UG7 e UG8 que são Turbinas Francis.

3.0 - CARACTERÍSTICAS DO REGULADOR INTEGRADO

As funcionalidades de regulação de tensão e regulação de velocidade do regulador integrado são descritas nas Tabelas 3 e 4 a seguir.

Tabela 3 - Funções de Regulação de Tensão do Regulador Integrado

FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
Regulação de Tensão (Automática)	Malha de controle de tensão terminal, com parâmetros para ajuste a vazio e em carga, com função seguidor de canal.
Regulação de Corrente de Campo (Manual)	Malha de controle de corrente de campo, com parâmetros para ajuste a vazio e em carga, possui função seguidor de canal e malha de controle de tensão terminal.
Regulação de Reativo e/ou Fator de Potência	Malha de controle de Potência Reativa, com função de seguimento das malhas de Controle de Tensão e Controle de Corrente. Ajuste de Parâmetros independente das demais malhas de controle. Pode-se optar por controle de Fator de Potência.
Comando direto	Malha para comando direto da ponte tiristorizada, para fins de testes e manutenção;
Controle das Referências	Controle Independente para as referências de controle de tensão terminal, controle de corrente de campo e controle de reativo/fator de potência, permitindo ajustes de valores máximos e mínimos, bem como taxas de aumentar e diminuir de forma independente.
Compensação de Reativos	Ajuste para Compensação de Reativos, devido a queda do transformador quando o mesmo faz o fechamento na barra da Alta Tensão ou Fechamento na Barra de Baixa Tensão;
Estabilizador de Sistema de Potência	Função PSS (Power System Stabilizer), para amortecimento de oscilações de potência. O Estabilizador é tipo Potência Acelerante utilizando canal de potência e canal de frequência.
Limitadores Dinâmicos	Limitador Volts/Hertz; Limitador de Máxima Corrente de Campo; Limitador de Subexcitação; Limitador de Mínima Corrente de Campo; Limitador de Corrente Estatórica
Reles de Tensão e Corrente de Campo	Programação de Reles de Tensão e Corrente de Campo com ajuste de "setpoint", histerese e tempo para atuação para aplicação em automatismos;
Medição de Frequência	Utiliza a medição de frequência por TP para Limitadores e Estabilizador de Sistema de Potência. (Mesmo canal de frequência da Regulação de Velocidade)
Supervisão de Falhas	Supervisão de medição de temperatura da ponte; Supervisão de condução da ponte de tiristores; Supervisão de ventilação da ponte de tiristores; Supervisão de tensão de sincronismo; Supervisão de tensão de comando da chave de campo; Supervisão de alimentação do Painel; de alimentação do Módulo; Supervisão de temperatura do transformador de excitação; Supervisão de corrente do transformador de excitação; Supervisão da pré-excitação; Supervisão de proteção por crowbar; Supervisão de fusíveis queimados; Supervisão de ventilação do cubículo; Supervisão de medição da tensão terminal; Supervisão de medição da corrente de campo; Supervisão de perda de comunicação remota; Supervisão contra falha à terra do campo do gerador;
Comutações Automáticas	Comutação automática do controle de tensão para controle de Corrente por falha na medição de tensão terminal; Comutação automática do controle de reativo para controle de Corrente por falha na medição de tensão terminal; Desabilitação Automática de funções de limitação dinâmica por perda de medição de frequência, medição de potência ou de tensão terminal;
Alto desempenho	Na excitação, permite uma aceleração controlada, sem degraus, oscilações ou sobre-curso excessivo. Na operação em vazio, proporciona respostas rápidas e rápido sincronismo. Na operação isolada, garante uma regulação primária otimizada com o adequado amortecimento e restabelecimento da tensão terminal, pós distúrbios. Na operação interligada, proporciona à

	regulação secundária de reativa, feita pelo operador ou por um Controle Automático de Geração - CAG, respostas rápidas, com taxas de variação ajustáveis. Nas rejeições de carga, garante o controle de tensão, mantendo a unidade geradora dentro dos limites de operação; Parada Parcial, sem rejeição de carga, com redução gradual da potência reativa e desligamento suave da carga, com opção para "speed no load" ou desexcitação;
--	---

Tabela 4 - Funções de Regulação de Velocidade do Regulador Integrado

FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
Regulação de Posição de Servo e Válvula	Malha de controle de posição do servo e malha de controle de posição da válvula, através de controle PID, com limitadores de sinais, ajuste de todos os parâmetros.
Regulação de Velocidade e Potência	Malha de controle e regulação automática de frequência e potência simultâneas, baseada em controlador PID, com parâmetros independentes a vazio e em carga; Faixa de regulação Automática Entre 70% e 120% (ajustável) Faixa de regulação Manual Entre 20% e 130% (ajustável)
Regulação manual	Malha para comando direto, regulação manual, para fins de testes e manutenção;
Controle das Referências	Controle Independente da Referência de Frequência e da Referência de Potência, permitindo ajustes de valores máximos e mínimos, bem como taxas de aumentar e diminuir;
Estatismos	Estatismo Transitório com parâmetros independentes para regulador a vazio e regulador em carga. Estatismo permanente com ajuste para posição ou potência;
Modos de Operação	Operação em Carga Isolada e Operação Interligada ao Sistema;
Tomada de Carga	Rampeamento de carga ajustável, com função para tomada rápida de carga, "feed forward", Função compensador em adianto para otimização das respostas aos comandos de carga
Limitador de Abertura	Limitador de abertura com parâmetros para máximo limitador, mínimo limitador e taxa ajustável para aumentar e diminuir Limitador;
Reles de Posição	Programação de Relês de Posição com ajuste de "setpoint", histerese e tempo para atuação para aplicação em automatismos, para supervisão de 0 a 100%;
Reles de Potência	Programação de Relês de Potência com ajuste de "setpoint", histerese e tempo para atuação para aplicação em automatismos, para supervisão inclusive com potência negativa;
Reles de Velocidade	Programação de Relês de Velocidade com ajuste de "setpoint", histerese e tempo para atuação para aplicação em automatismos, para Supervisão de 0 a 200%;
Canais de Medição de Frequência	Supervisão de Medição de Frequência, com ajustes independentes para cada canal, opção de Medição por pick-up e medição por TP;
Supervisão de Falhas	Supervisão de medição de frequência; Supervisão de medição de potência; Supervisão de medição de posição de servo; Supervisão de medição de posição de válvula; Supervisões do Sistema Hidráulico; Supervisões de Partida do Sistema; Supervisões de Parada do Sistema; Supervisões de Alimentação do Sistema; Supervisões de Comunicação;
Comutações Automáticas	Comutação por perda de um Canal de Regulação promove uma comutação automática de canal principal para canal retaguarda e vice e versa. As falhas podem ser por perda de alimentação, falha do Módulo de CPU ou Módulos de I/Os; Comutação automática por falha na medição de frequência, comutando a medição de frequência para o outro canal de frequência em operação; Comutação automática no modo de operação de Estatismo de Potência para Estatismo de posição;
Alto desempenho	Na partida, permite uma aceleração controlada, sem degraus, oscilações ou sobre-curso excessivo; Na operação em vazio, proporciona respostas rápidas e rápido sincronismo, compensando corretamente eventuais ciclos limites inerentes às partes mecânicas do sistema de regulação; Na operação isolada, garante uma regulação primária otimizada com o adequado amortecimento e restabelecimento da frequência, pós distúrbios; Na operação interligada, proporciona à regulação secundária de potência, feita pelo operador ou por um Controle Automático de Geração - CAG, respostas rápidas, com taxas de variação ajustáveis, e independentes dos ajustes otimizados para a regulação primária de frequência; Nas rejeições de carga, garante fechamentos do distribuidor com sobrepressão no conduto e sobrevelocidade dentro das margens de segurança previstas; Parada Parcial, sem rejeição de carga, com redução gradual da potência e desligamento suave da carga, com opção para "speed no load"

4.0 - COMPORTAMENTO DINÂMICO DO REGULADOR INTEGRADO

A demonstração do desempenho do sistema integrado em hidrogeradores acima de 100 MW é apresentada abaixo.

Os registros apresentados foram obtidos com o registrador de sinais interno de cada controlador e foram retirados das unidades geradoras UG09 (105 MW), UG08 (84 MW) e UG5 (54 MW).

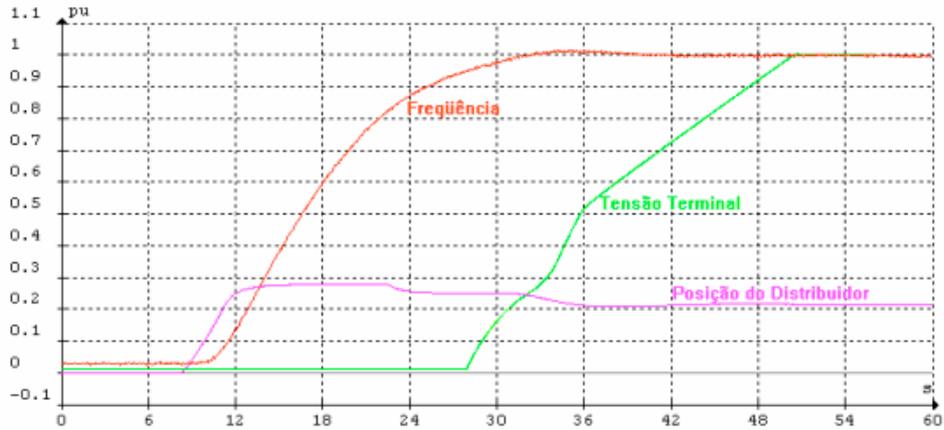


Figura 1 - Resposta Dinâmica a Partida da Unidade Geradora

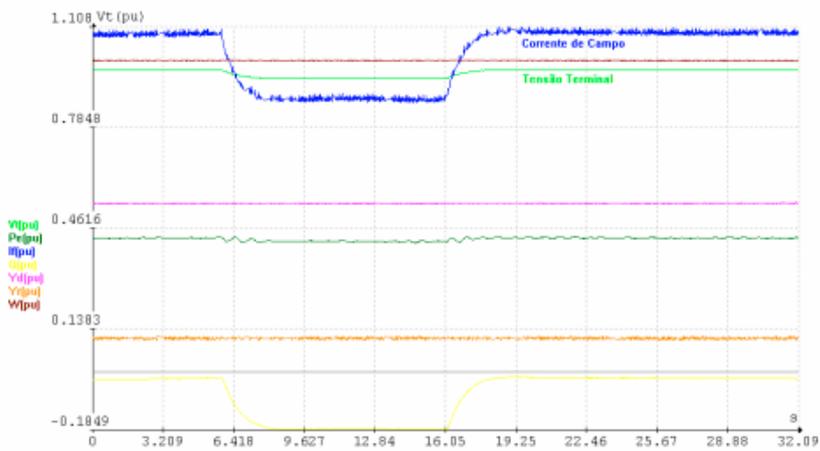


Figura 2 - Resposta Dinâmica a um Degrau de Tensão em Carga

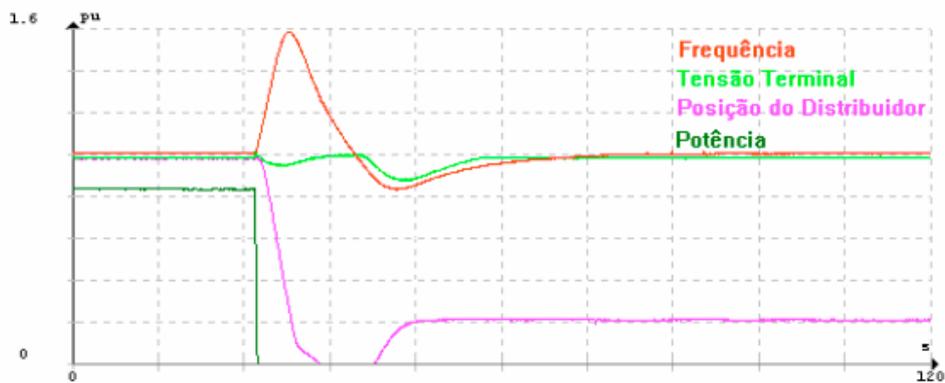


Figura 3 - Resposta Dinâmica a uma Rejeição de Carga

5.0 - RESULTADOS ECONÔMICOS DO REGULADOR INTEGRADO

O fator econômico é preponderante na determinação de modernizar um sistema. Neste ponto é importante salientar as vantagens econômicas advindas da integração. E elas são várias, não só o custo direto da aquisição como também os custos advindos da manutenção e colocação em operação da unidade geradora devem contar:

- Custo de aquisição;
- Ganhos em geração pela confiabilidade e maior disponibilidade;
- Menor custo de comissionamento;
- Redução de custo da manutenção;
- Redução de componentes na interface e nos periféricos;
- Redução do custo da engenharia;
- Economia de espaço físico;
- Menor consumo de energia;
- Menos componentes em estoque para reposição;

Podemos observar que além de vantagens econômicas existem vantagens técnicas:

- Maior confiabilidade do sistema
- Maior disponibilidade
- Menor tempo de comissionamento
- Facilidades de manutenção devido à integração
- Simplificação de projeto, reduzindo a interface física, componentes, cabos, etc...
- Redução de espaço físico
- Aumento de confiabilidade em função de redundâncias ativas;
- Incorporação de novas funcionalidades advindas do processo de integração;

6.0 - CONCLUSÃO

A integração de sistemas de regulação de tensão com sistemas de regulação de velocidade apresenta vantagens para máquinas de grande e pequeno porte.

A tendência apresentada, de evolução dos sistemas de regulação em integração com sistemas de automação,, apresenta ganhos significativos para a aplicação de um sistema integrado, somando a este os ganhos em escala, no desenvolvimento da manutenção e desenvolvimento da engenharia de projeto.

Um bloco único de controle e automação permite vislumbrar uma nova era para a engenharia de sistemas de geração no qual a evolução tecnológica influencia sobremaneira na forma de se projetar, desenvolver e criar os futuros projetos de geração.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ZENI Jr., N. et alii, "Controlador com Estrutura Programável pelo Usuário", II Simpósio Brasileiro de Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas, Canela, Rio Grande do Sul, Abril de 2000.
- (2) PAIVA, P.M.P., "Sistema Integrado de Controle de Unidades Geradoras", I ENTEC – Encontro Técnico sobre PCHs, CEMIG, Três Marias, Abril de 2000.
- (3) PAIVA, P.M.P., "Modernização de Reguladores de Velocidade", Palestra Proferida em Reunião Técnica do GTMU, Outubro de 1996.
- (4) FERREIRA et alii, "Sistema de Monitoração de Oscilações: Aplicação no Sistema Argentino", FL/GPC/18, XIV SNPTEE, Belém, 1997.
- (5) ZENI Jr., N. et alii, "Modernização do Controle dos Grupos Geradores para Ensaio de Transformadores e Reatores na Fábrica", I Seminário Nacional de Controle e Automação, Salvador, BA, Novembro de 1999.
- (6) MUSSATTO, R. et alii, "Sistema de Monitoração de Distúrbios e de oscilações em Sistemas Elétricos de Potência", I Seminário Nacional de Controle e Automação, Salvador, BA, Novembro de 1999.
- (7) NEVES, F.C. et alii, "Aplicações em Usinas Hidrelétricas de Controlador com Estrutura Programável pelo Usuário", II Simpósio Brasileiro de Pequenas e Médias Centrais Hidroelétricas, Canela, RS, Abril de 2000.
- (8) REIVAX automação e controle, Relatórios de Comissionamento UG9, UG8, UG7 e UG6, Florianópolis anos 2003, 2004, 2005 e 2006.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Ângelo Mibielli

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 06 de junho de 1967.

Graduação (1992) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal de Santa Catarina - SC

Empresa: Reivax Automação e Controle, desde 1996

Stanley Pratti

Nascido em Vitória ES, em 27 de março de 1955

Graduação (1986) em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de Ituiutaba - Minas Gerais

Empresa: Endesa Cachoeira do Grupo ENDESA, desde 1997.

Roger Ferreira Suruagy

Nascido no Rio de Janeiro, 28 de novembro de 1953.

Graduação (1977) em Engenharia Elétrica-Eletrônica pela Faculdade de Eng. General Roberto Lisboa, Rio de Janeiro.

Empresa: Endesa Cachoeira do Grupo ENDESA, desde 1997

Ciro Borges Karia

Nascido Goiânia - GO em 08 de 12 de 1972

Graduação (1998) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás

Empresa: Endesa Cachoeira Grupo ENDESA, desde 2000

Leonardo Augusto Weiss

Nascido em Lages - SC em 07 de março de 1980.

Graduação (2004) em Engenharia de Automação e Controle: Universidade Federal de Santa Catarina - SC

Empresa: Reivax Automação e Controle, desde 2004

Moacir Fassina Junior

Nascido em Santo André - SP em 04 de dezembro de 1965.

Graduação (1994) em Engenharia Elétrica: Universidade Federal de Santa Catarina - SC

Empresa: Reivax Automação e Controle, desde 1996

Fernando Amorim Silveira

Nascido em Florianópolis - SC em 26 de junho de 1978.

Graduação (2002) em Engenharia Mecânica: Universidade Federal de Santa Catarina - SC

Empresa: Reivax Automação e Controle, desde 2003