

GERALDO SCHUMANN CUNHA

“USINA DIESEL” EM USINAS HIDRELÉTRICAS

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Instituto de Eletrotécnica e Energia; Escola Politécnica; Instituto de Física e Faculdade de Economia e Administração) para a obtenção do título de Mestre em Energia.

Orientação: Prof. Dr. Geraldo Francisco Burani

São Paulo
2006

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

FICHA CATALOGRÁFICA

Cunha, Geraldo Schumann.

“Usina diesel” em usinas hidrelétricas / Geraldo Schumann Cunha;
orientador Geraldo Francisco Burani – São Paulo, 2006.

131p.: il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação
em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo.

1. Usinas Hidrelétricas. 2. Usinas a Diesel
3. Recursos Energéticos 4. Geração de Energia Elétrica I. Título.

Dedicatória

Dedico esta Dissertação de Mestrado à minha mãe Eulália Rennó Schumann Cunha, professora do ensino primário de Minas Gerais; ao meu pai Jair Cunha (in memorian), ex-combatente da 2ª guerra mundial e alfaiate; à minha esposa Magali Coli Schumann e ao meu filho Henrique Coli Schumann.

Agradecimento

Agradeço ao misericordioso Deus pela saúde e disposição para conclusão deste trabalho.

Agradeço à minha paciente família, esposa e filho, pela compreensão da importância deste projeto para mim, apoiando-me e renunciando às horas de convivência e lazer.

Agradeço aos familiares, especialmente à minha mãe, e aos amigos que me apoiaram nesta jornada.

Agradeço, também aos professores, colegas e funcionários (em especial à secretária Aparecida Rosa de Souza Tarábola) do IEE-USP (Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo) pela amizade, compreensão e pelos momentos convividos, aprendizados e trocas de experiências.

Agradeço à Voith-Siemens Hydro Power Generation (em especial ao Sr. Dr. Henrique Prado Alvarez e Sr. Mário Antônio de Almeida) que disponibilizaram-me horário para cursar as disciplinas necessárias para realização desta dissertação.

Agradeço às empresas DCML-Distribuidora Cummins Minas S/A (em particular, ao Sr. Giuseppe Eduardo Bellezza), à Leme Engenharia – MG (especialmente ao Sr. Dejair Soares Porto), à Quater Engenharia (destacadamente ao Sr. Gladstone Ramos), à Copem Engenharia (em particular, ao Sr. Sérgio Rocha), à COGEN – SP (Sr. Walter T. Yoshida) e às companhias geradoras de energia hidrelétrica pelas informações prestadas e disponibilizadas.

Agradecimento aos professores da banca examinadora Dr. Délvio Franco Bernardes (UNIFEI – Itajubá/MG), Dr. José Aquiles Baesso Grimoni ((PIPGE/USP) pelos comentários, análises e aconselhamentos e uma gratidão muito especial ao meu orientador, Dr. Geraldo Francisco Burani, pela sua atenção, amizade, compreensão e confiança. MUITO OBRIGADO.

Epígrafe

“Quando a alma, ao termo de mil hesitações e desenganos, cravou as raízes para sempre num ideal de amor e de verdade, podem calcá-la e torturá-la, podem-na ferir e ensangüentar, que, quanto mais a calcam, mais ela penetra no ideal que busca, mais ela se entranha no seio ardente que deseja”.

Guerra Junqueiro

RESUMO

CUNHA, G.S. **“Usina diesel” em usinas hidrelétricas**. 2006.131p. Dissertação de Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

Esta dissertação de mestrado refere-se ao estudo da viabilidade do uso de “usina diesel” acima de 500 kVA, para fornecimento de energia elétrica aos equipamentos auxiliares elétricos de usinas hidrelétricas no Brasil, como uma alternativa ao uso de único grupo motor diesel-gerador (“grupo singelo”) que, atualmente, é importado para valores acima de 500 kVA.

Assim, baseado em uma análise exemplificativa, pretende-se obter subsídios para se decidir a melhor opção entre importar grupo motor diesel-gerador de grande capacidade ou comprar, no mercado brasileiro, “usina diesel” (formada por 02, 03 ou mais grupos motor diesel-gerador operando em paralelo), considerando-se os aspectos de preço, instalação, operação e manutenção.

E, para maior entendimento deste tema, esta dissertação apresentará um breve conceito de cargas elétricas de uma usina hidrelétrica (incluindo os critérios de classificação de cargas essenciais, de carga permanente, de carga de ponta e de demanda máxima), das classes de potências de grupo motor diesel-gerador e do estado da arte de “usina diesel” no Brasil.

Também, serão apresentados exemplos sobre critérios de cálculo para grupo motor diesel-gerador, exigências de fabricante para unidade hidrogeradora (relativos aos mancais escora / combinado e regulador de velocidade) e de necessidades / critérios do usuário final (companhias produtoras de energia hidrelétrica).

Palavras chaves: usina hidrelétrica; serviços auxiliares elétricos; “usina diesel”; paralelismo; divisão de cargas.

ABSTRACT

CUNHA, G.S. **“Diesel power plant” in hydroelectric power plants.** 2006.131p. Masters Dissertation - **Post**-Graduation in Energy Inter-units Program / Universidade de São Paulo.

This masters dissertation refers to the feasibility study of using "diesel power plants" over 500 kVA as the energy supply for the auxiliary electrical equipment of hydroelectric power plants in Brazil, as an alternative to the use of single diesel generator sets which, nowadays, is imported for outputs above 500 kVA.

Therefore, using an example-based analysis, it is intended to obtain subsidies for allowing one to decide which is the best option: importing a large capacity diesel generator set or buying, in the brazilian market, a “diesel power plant” (consisting of 2, 3 or more diesel generator sets operating in parallel), considering price, installation, operation and maintenance aspects.

Furthermore, for a better understanding, this masters dissertation will present a brief concept of the electrical loads in a hydroelectric power plant (including classification criteria such as essential, permanent, peak and maximum demand), of the output classes of diesel generator sets and of the state-of-the-art of “diesel power plants” in Brazil.

There will also be presented examples of calculation criteria for diesel generator sets, manufacturer demands for the hydroelectric main power unit (related to the combined thrust and guide bearing and turbine governor) and examples of the necessity / criteria of the end user (hydroelectric power producer utilities).

Key-words: hydroelectric power plant, electrical auxiliary services, diesel power plant, parallel operation, load sharing

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 - Vista geral da UHE Itaipu - lago e barragens	27
Figura 2 - Conduto forçado da UHE Itaipu	28
Figura 3 - Vista geral de uma subestação elétrica em alta tensão	29
Figura 4 - Vista de equipamentos de uma subestação elétrica em alta tensão	30
Figura 5 - Linha de transmissão de energia elétrica em “circuito simples”	31
Figura 6 - Linha de transmissão de energia elétrica em “circuito duplo”	31
Figura 7 - Exemplo de empreendimento hidrelétrico em diagrama de blocos	33
Figura 8 - Ilustração em corte de uma unidade hidrogeradora	36
Figura 9 - Barramento blindado de fases isoladas - vista monofásica	40
Figura 10 - Barramento blindado de fases isoladas - vista trifásica	41
Figura 11 - Vista de um disjuntor trifásico em baixa tensão elétrica	43
Figura 12 - CCM – vista geral	45
Figura 13 - Banco de baterias estacionárias	47
Figura 14 - Sala de baterias estacionárias com exaustão inadequada	55
Figura 15 - Desenho unifilar geral de uma usina hidrelétrica	71
Figura 16 - Vista geral de um grupo motor diesel-gerador de 500 kVA máximos	73
Figura 17 - Vista gráfica da classificação “stand-by”	77
Figura 18 - Vista gráfica da classificação “contínuo ou prime power”	78
Figura 19 - Vista gráfica da classificação “básica ou base power”	79
Figura 20 - Foto de uma “usina diesel” em usina hidrelétrica	83
Figura 21 - Visão geral de uma “usina diesel”	88
Figura 22 - Desenho unifilar geral para os serviços auxiliares elétricos - de uma Usina hidrelétrica	100
Figura 23 - Vista frontal de um painel de sincronismo e paralelismo - de uma “Usina diesel”	109

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 3.1 - Exemplo de lista de cargas de uma unidade hidrogeradora - Com turbina tipo “Kaplan”	58
Tabela 3.2 - Exemplo de lista de cargas de uma subestação de alta tensão - Associada a uma usina hidrelétrica	61
Tabela 3.3 - Exemplo de lista de cargas do vertedouro e cargas gerais - de uma Usina hidrelétrica	62
Tabela 3.4 - Exemplo de lista de cargas para cálculo de demanda máxima - de uma Usina hidrelétrica (com turbina “Kaplan”)	66
Tabela 3.5 - Dados gerais de grupo motor diesel-gerador (fabricantes variados)	80
Tabela 3.6 - Resumo parcial e preliminar de “usina diesel” no Brasil - 02/2006 - Geração	87
Tabela 3.7 - Resumo parcial e preliminar de “usina diesel” no Brasil - 02/2006 - Cogeração	87
Tabela 3.8 - Potências totais de UHE’s em operação e outorgadas no Brasil - 2006	89
Tabela 5.1 - Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 900 kVA - Fevereiro / 2003	114
Tabela 5.2 - Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 900 kVA - Fevereiro / 2006	114
Tabela 5.3 - Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 650 kVA - Setembro / 2002	115
Tabela 5.4 - Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 650 kVA - Fevereiro / 2006 - Sem expurgo parcial do IGP-M	115
Tabela 5.5 - Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 650 kVA - Setembro / 2002	116
Tabela 5.6 - Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 650 kVA - Fevereiro / 2006 - Com expurgo parcial do IGP-M	116
Tabela 6.1 - Exemplos de grupo motor diesel-gerador em usina hidrelétrica	125

LISTA DE SIGLAS – INSTITUIÇÕES

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	-	American National Standard Institute
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
COGEN SP	-	Associação Paulista de Cogeração de Energia
DIN	-	Deutsches Institut Für Normung
FEI	-	Faculdade de Engenharia Industrial (integrante do Centro Universitário da FEI)
FGV	-	Fundação Getúlio Vargas
IEC	-	International Electro-technical Commission
IEE	-	Institution of Electrical Engineers
IEE-USP	-	Instituto de Eletrotécnica e de Energia da USP
ISO	-	International Organization for Standardization
IGP-M	-	Índice Geral de Preços de Mercado (publicado pela FGV)
MME	-	Ministério das Minas e Energia
NEMA	-	National Electrical Manufactures Association
ONS	-	Operador Nacional do Sistema Elétrico
UFU	-	Universidade Federal de Uberlândia
UNICAMP	-	Universidade Estadual de Campinas
UNIFEI	-	Universidades Federal de Itajubá
USP	-	Universidade de São Paulo
VDE	-	Verband Deutscher Elektrotechniker
VSPA	-	Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda – São Paulo

LISTA DE ABREVIATURAS – TERMOS TÉCNICOS

AT	- alta tensão
BT	- baixa tensão
CA	- corrente alternada
CC	- corrente contínua
CCM	- centro de comando de motores
CCM1	- centro de comando de motores 1 (análogos aos demais centros de comando de motores)
CF	- casa de força
EPC	- Engineering Procurement and Construction
FC	- fator de carga
GMG	- grupo motor diesel-gerador
GMG1	- grupo motor diesel-gerador 1 (análogos aos demais grupos motor diesel-gerador)
IP	- taxa de redução de disponibilidade por manutenção programada
LS	- load sharing
LTP	- limited prime power
MT	- média tensão
NBR	- norma brasileira
PA	- potência assegurada
PCH	- pequena central hidrelétrica
PDG	- painel de distribuição geral
PDGA	- painel de distribuição geral do lado A
PDGB	- painel de distribuição geral do lado B
PDG-VT	- painel de distribuição geral do vertedouro
PEXT	- painel de alimentação externa
PEXT1	- painel de alimentação externa 1 (análogos aos demais painéis de alimentação externa)
PGD	- painel do grupo motor diesel-gerador
PGD1	- painel do grupo motor diesel-gerador 1 (similares aos demais painéis do grupo motor diesel-gerador)

PL	- painel de iluminação e tomadas
PMG	- permanent magnet generator
PRP	- prime power
PSIN	- painel de sincronismo e paralelismo do grupo diesel
RT	- regulador de tensão
RV	- regulador de velocidade
SAE	- serviços auxiliares elétricos
SDSC	- sistema digital de supervisão e controle
SE	- subestação
SF ₆	- gás hexafluoreto de enxofre
TEIF	- taxa equivalente de indisponibilidade forçada
TD	- tomada d'água
TRA	- transformador de potência abaixador auxiliar
TRA1	- transformador de potência abaixador auxiliar do hidrogerador 1(1 (similares aos demais transformador de potência abaixador auxiliar)
TREX	- transformador de potência abaixador auxiliar relativo ao painel de alimentação externa
TREX1	- transformador de potência abaixador auxiliar relativo ao painel de alimentação externa 1 (análogos aos demais transformadores)
UD	- usina diesel
UHE	- usina hidrelétrica
UPS	- uninterruptible power supply
UTE	- usina térmica
VT	- vertedouro

LISTA DE SÍMBOLOS

kVA	-	quiloVolt-Ampère
A	-	Ampère
kV	-	quiloVolt
kW	-	quiloWatt
P_N	-	potência ativa nominal disponibilizada (em kW)
η	-	letra grega para representação de rendimento da carga (física)
S_N	-	potência aparente nominal (em kVA)
P_C	-	potência ativa consumida da fonte de energia (em kW)
Q	-	potência reativa (em kVAr)
kVAr	-	quiloVolt-Ampère reativo
cos	-	função matemática trigonométrica “cosseno”
φ	-	letra grega para representação de ângulo (matemática / geometria)
cos φ	-	fator de potência da carga
j	-	símbolo matemático para números complexos
tg	-	função matemática trigonométrica “tangente”
I_P	-	corrente de partida do motor elétrico
I_N	-	corrente nominal do motor elétrico
I_P/I_N	-	relação entre corrente de partida e corrente nominal do motor
h/a	-	hora/ano
%	-	porcentagem
V	-	Volt
dB	-	deciBell
m	-	metro
mm	-	milímetro
kg	-	quilograma
s	-	segundo
MW	-	megaWatt
GW	-	gigaWatt
S	-	potência elétrica aparente ou potência total
U	-	tensão elétrica
I	-	corrente elétrica

I_{CP}	-	corrente total de partida
x''_d	-	reatância subtransitória de eixo direto
ΔU	-	queda de tensão
mA	-	miliAmpère
$^{\circ}C$	-	grau Célsius
min	-	minuto
m^2	-	metro quadrado

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

2. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

2.1. OBJETIVO

2.2. JUSTIFICATIVA

3. CONCEITOS GERAIS

3.1. INTRODUÇÃO

3.2. USINAS HIDRELÉTRICAS

3.2.1. Introdução

3.2.1.1. Visão geral de um empreendimento hidrelétrico

3.2.1.2. Conceito sobre turbina hidráulica

3.2.1.3. Conceito sobre gerador elétrico

3.2.1.4. Ilustração em corte de uma “unidade hidrogeradora”

3.2.2. Condições operativas das unidades hidrogeradoras

3.2.3. Sistema auxiliar elétrico

3.2.3.1. Em corrente alternada

3.2.3.1.1. Transformador de potência abaixador auxiliar

3.2.3.1.2. Painéis de distribuição geral e de carga

3.2.3.1.3. Painéis de Iluminação e Tomadas

3.2.3.1.4. Pannel de alimentação externa

3.2.3.1.5. Grupo motor diesel-gerador

3.2.3.2. Em corrente contínua

3.2.4. Serviços auxiliares elétricos

3.2.4.1. Introdução

3.2.4.2. Importância dos serviços auxiliares elétricos

3.3. CARGAS ELÉTRICAS SUPRIDAS PELOS SERVIÇOS AUXILIARES ELÉTRICOS

3.3.1. Introdução

3.3.2. Cargas elétricas da casa de força

3.3.3. Cargas elétricas da subestação elétrica

3.3.4. Cargas elétricas da tomada d'água e do vertedouro

3.4. CRITÉRIOS PARA CARGAS ELÉTRICAS E PARA DEMANDAS

3.4.1. Introdução

3.4.2. Cargas essenciais

3.4.3. Cargas permanentes

3.4.4. Cargas de ponta

3.4.5. Demanda instantânea e demanda média

3.4.6. Demanda máxima provável

3.5. FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA PARA OS SERVIÇOS AUXILIARES ELÉTRICOS

3.5.1. Fontes primárias internas

3.5.1.1 Introdução

3.5.1.2 Fonte primária interna específica

3.5.1.3 Fonte primária interna comum

3.5.2. Fonte secundária externa

3.5.3. Fonte de emergência

3.6. GRUPO MOTOR DIESEL-GERADOR PARA USINA HIDRELÉTRICA

3.6.1. Introdução

3.6.2. Classificação de potências

3.6.3. Composição geral de um grupo motor diesel-gerador

3.6.4. “Usina diesel”

3.6.5. Condições de dimensionamento

4. **“USINA DIESEL” PARA USINA HIDRELÉTRICA COM TRÊS UNIDADES HIDROGERADORAS**

4.1. PREMISSAS DE CONFIGURAÇÃO ADOTADAS

4.2. DESCRIÇÃO FUNCIONAL DA CASA DE FORÇA

4.2.1. Transferência automática

4.2.2. Sistema de alívio de cargas

4.2.3. Controle e supervisão de grupo motor diesel-gerador

4.2.4. Partida e parada de grupo motor diesel-gerador

4.3. ANÁLISE TÉCNICA

5. EXEMPLO COMPARATIVO DE “USINA DIESEL” E “GRUPO SINGELO”

5.1. EXEMPLO PARA 900 kVA – CONTÍNUO

5.2. EXEMPLO PARA 650 kVA – CONTÍNUO

5.3. ANÁLISE ECONÔMICA

6. EXEMPLO COMPARATIVO DE “USINA DIESEL” E “GRUPO SINGELO”

6.1. EXEMPLO PARA 900 kVA – CONTÍNUO

6.2. EXEMPLO PARA 650 kVA – CONTÍNUO

6.3. ANÁLISE ECONÔMICA

7. CONCLUSÃO

8. RECOMENDAÇÃO

9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. INTRODUÇÃO

As usinas hidrelétricas (UHE) brasileiras, que necessitam de fornecimento de energia elétrica de emergência acima de 500 kVA máximos para os serviços auxiliares elétricos da casa de força (CF), em sua quase totalidade, utilizam um único grupo motor diesel-gerador (GMG) importado, ao invés de se usar uma “usina diesel” (UD).

Embora, atualmente o conceito de “usina diesel” (vários grupos motor diesel-gerador de potência menor em paralelo, cuja potência total equivale a um único grupo motor diesel-gerador de maior potência (aqui denominado de “grupo singelo”)) seja amplamente conhecido e utilizado em diversos setores da sociedade mundial, a adoção desta concepção em usinas hidrelétricas no Brasil não é prática comum.

Tal dificuldade deve-se às presentes dúvidas quanto ao fato da “usina diesel” ser capaz de atender aos requisitos técnicos de operação, comando, proteção e controle, além de questionamentos sobre manutenção e área de instalação.

2. OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

2.1. OBJETIVO

Esta dissertação de mestrado tem por objetivo a discussão da viabilidade da aplicação de “usina diesel” em usinas hidrelétricas a serem implantadas no Brasil.

Neste contexto, a discussão será através de análises exemplificativas onde serão considerados critérios de projeto de engenharia elétrica e exigências tanto de fabricante de unidades hidrogeradoras como de usuários finais (companhias geradoras de energia hidrelétrica), bem como quesitos de manutenção, sobressalentes e pós-venda.

Além do propósito acima, o autor pretende, também, contribuir para o desenvolvimento de procedimentos e critérios para esclarecimento de dúvidas e questionamentos quanto ao uso de “usina diesel” em usinas hidrelétricas, notadamente nos quesitos específicos de paralelismo, operação e proteção e carregamento.

2.2. JUSTIFICATIVA

De um modo geral, a parcela maior do mercado mundial para o grupo motor diesel-gerador de energia elétrica é composto pelos setores industrial, comercial, residencial (condomínios) e hospitalar. Para tais segmentos não há necessidades de se ter uma maior complexidade em controle, comando, proteção e operação do grupo motor diesel-gerador.

Porém, para os grupos motor diesel-gerador importados, acima de 500 kVA máximos, a serem usados em usinas hidrelétricas, será necessário uma lógica (painel) adicional de interface entre o grupo motor diesel-gerador e o sistema digital de supervisão e controle (SDSC) da usina hidrelétrica, por exemplo.

Complementarmente, há falta de literatura sobre “usina diesel”, voltada para aplicação em usinas hidrelétricas, detalhando melhor os critérios específicos para dimensionamento, aterramento, sincronismo, paralelismo, operação e proteção e carregamento.

Assim, falta de literatura e de quantidade significativa de referências práticas em usinas hidrelétricas (em funcionamento) dificultam a aceitação de “usinas diesel”.

Isto ocorre pelo fato das companhias geradoras de energia hidrelétrica, em geral, focarem atendimento às exigências técnicas e, com isso, adquirirem grupos motor diesel-gerador de potências maiores que 500 kVA (máximos e importados), ao invés de se implementar “usina diesel” com grupos motor diesel-gerador de potências menores.

Neste contexto, além de dúvidas sobre eficácia e eficiência de “usina diesel”, os fatores que dificultam a aplicabilidade da mesma em usinas hidrelétricas podem ser resumidos em:

- Opção dos fabricantes de motores diesel por não fabricarem, no Brasil, motores diesel para grupo motor diesel-gerador acima de 500 kVA máximos;
- Existência, na maioria das companhias geradoras de energia hidrelétrica, da prática de se adotar um único grupo motor diesel-gerador;

- E, conforme acima mencionado, falta de referências práticas em quantidade significativa e falta de literaturas explícitas sobre “usina diesel” para aplicação em usinas hidrelétricas.

Torna-se importante esta discussão, pois toda usina hidrelétrica necessita de uma geração de energia elétrica de emergência como alternativa para o restabelecimento da usina hidrelétrica (no caso de ausência total de energia para os serviços auxiliares elétricos da UHE. (black-out)) e para suprir as necessidades de energia elétrica para serviços mínimos de segurança (iluminação de emergência, alarmes, vigilância, comunicação, etc).

Isto é, toda usina hidrelétrica necessita de energia elétrica para manter a integridade física do empreendimento e ter capacidade para partir uma unidade hidrogeradora, uma vez que o sistema de energia em corrente contínua não é para estas finalidades.

Como no atual modelo de desverticalização (distinção entre empresas do setor elétrico em geradoras, distribuidoras e empresas transmissoras), é evitado o uso de energia elétrica externa como fonte alternativa à falta de energia derivada das unidades hidrogeradoras, a fonte de emergência, através de grupo motor diesel-gerador, é imprescindível.

Assim, mostrando-se a viabilidade do uso de “usina diesel”, a indústria nacional será incrementada, uma vez que não haverá necessidade de importação (para os casos acima de 500 kVA máximos), além de se colaborar com a balança de comércio exterior.

Em suma, justifica-se a presente dissertação para, com maiores esclarecimentos, ter-se um embasamento maior sobre aplicação de “usina diesel” em usina hidrelétrica e, com isso, contribuir para a ruptura da prática do uso de “grupo singelo”, até então adotada.

3. CONCEITOS GERAIS

3.1. INTRODUÇÃO

Para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, o autor, que trabalha na área de fabricação de geradores elétricos e de turbinas hidráulicas, além do fornecimento dos demais equipamentos elétricos para usinas hidrelétricas, utilizou também de sua vivência profissional, ou seja, de sua experiência adquirida em diversas etapas de vários empreendimentos hidrelétricos de portes e configurações variadas.

Tais empreendimentos foram tanto para empresas estatais como para empresas privadas, bem como para “empresas consórcios” nas modalidades de Engineering Procurement and Construction (EPC) e chave na mão (turn-key).

Assim, o autor participou da elaboração de propostas técnicas (inclusive de especificações técnicas); proferiu palestras técnicas (pela empresa onde trabalha (Voith Siemens Hydro Power Generation Ltda – São Paulo (VSPA)) tanto internas (curso de usina hidrelétrica) como externas (de divulgação tecnológica)).

As palestras externas foram ministradas em eventos culturais de diversas instituições de ensino tais como: Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Faculdade de Engenharia Industrial (FEI - integrante do Centro Universitário da FEI).

O autor também atuou em administração de contratos e trabalha, atualmente, com coordenação de projeto elétrico e com coordenação de fornecimento de equipamentos e sistemas elétricos para usina hidrelétrica (incluindo os componentes e interfaces referentes à casa de força, à subestação de alta tensão elétrica, às linhas de transmissão de energia elétrica, à tomada d'água e ao vertedouro). Em todas estas atividades, houve grande interação com empresas projetistas elétricas tradicionais do Brasil e com fornecedores de equipamentos.

Assim, nesta dissertação de mestrado, o autor promoveu uma consolidação de diversas especificações técnicas, memoriais de cálculo, critérios e procedimentos de projeto, agregando, assim, sua experiência ao tema através de um exemplo de “usina diesel” (constituída por dois grupos singelos) aplicável a uma usina hidrelétrica com três unidades hidrogeradoras. Para tal, o autor efetuou um levantamento do estado da arte da concepção “usina diesel” em usinas hidrelétricas e das restrições da unidade hidrogeradora, além de sistematizar os critérios e premissas de dimensionamento de energia emergencial para usina hidrelétrica.

Dessa forma, o autor preferiu não citar detalhadamente as identificações dos empreendimentos hidrelétricos, dos documentos de projeto (impedimentos de divulgação), uma vez que a idéia geral é resultante dessa simbiose entre o cotidiano profissional do autor e sua interação com empresas.

Logo, muitos conceitos e critérios foram discutidos e consolidados em reuniões de trabalho referentes aos projetos energéticos onde o autor participou efetivamente.

Desta maneira, vários tópicos, abordados pelo autor nesta dissertação, representam práticas comuns, possíveis de serem constatadas nas diversas obras já entregues ou sendo construídas. Naturalmente, quando possível, o autor fez as citações pertinentes ou utilizou identificações fictícias.

Entretanto, nos itens agradecimento e referências bibliográficas, as citações generalizadas foram efetuadas.

3.2. USINAS HIDRELÉTRICAS

3.2.1. Introdução

Entende-se por usina hidrelétrica como sendo um aproveitamento energético que disponibiliza energia elétrica nos terminais dos geradores elétricos síncronos, devidamente excitados, a partir do acionamento de turbinas hidráulicas por fluxos de água.

3.2.1.1. Visão geral de um empreendimento hidrelétrico

Em termos gerais, um empreendimento hidrelétrico, no modelo atual de desverticalização, é composto de dois blocos interligados por uma linha de transmissão, chamada, normalmente, de linha curta. Tais blocos são: usina hidrelétrica e subestação elétrica (SE) associada.

A seguir, estes blocos serão mais detalhados, no tocante a equipamentos, funções e subdivisões.

* “Bloco usina hidrelétrica”:

Neste bloco, têm-se duas partes: “parte relativa à casa de força” e “parte relativa ao conjunto tomada d’água (TD) e vertedouro (VT)”.

- “Parte relativa à casa de força”:

Nesta parte, em termos gerais, há dois setores de equipamentos, sendo um “setor de geração” e o outro, “setor de transformação”.

- “Setor de geração” (interno à casa de força):

É, basicamente, composto pela unidade hidrogeradora (turbina hidráulica e gerador elétrico) e pelos equipamentos associados para regulação e proteção, para operação, para medição e faturamento de energia elétrica e para comando e controle.

Também fazem parte deste os equipamentos e sistemas referentes aos serviços auxiliares eletromecânicos e a interligação entre este setor e o setor seguinte.

- “Setor de transformação” (geralmente, externo à casa de força):

Este setor é composto pelo transformador de potência elevador e equipamentos associados de proteção e manobra, para possibilitarem uma tensão elétrica de transmissão superior a de geração.

Por motivos técnico-econômicos e dependendo da potência gerada e transmitida, destaca-se que, na maioria dos casos, a interligação entre transformador elevador e terminais do gerador elétrico dos dois setores acima citados, é feita por barramentos blindados de fases isoladas (pressurizados ou não).

Destaca-se, também que a tensão elétrica de geração é em média tensão elétrica (MT) enquanto que a transmissão de energia elétrica é efetuada, geralmente, em alta tensão elétrica (AT).

- “Parte relativa ao conjunto tomada d’água e vertedouro”:

Na tomada d’água, a água é captada para acionamento das turbinas, através de um sistema de adução que, em geral, poderá ser por condutos forçados ou túneis de adução (escavados em rocha com revestimento ou não).

No vertedouro, é escoado o excesso de água que não passará pelas turbinas ou é escoada água em outras manobras como, por exemplo, para garantir vazão sanitária (atender as necessidades hídricas à jusante).

Estas necessidades vão desde o abastecimento de água para cidades até às atividades agropecuária e industrial, para o caso do empreendimento hidrelétrico não estiver em operação ou, quando em operação, não houver vazão hídrica suficiente.

A “Figura 1”, a seguir, mostra uma visão aérea da “Usina Hidrelétrica Itaipu” onde se tem:

- Posição 1: o lago de Itaipu (“represa” – “lado de montante”);
- Posição 2: barragem principal (neste caso, se localiza a “tomada d’água”): representa o divisor entre o “lado de montante” e o “lado de jusante”;
- Posição 3: o conduto forçado (vide “Figura 2”);



Figura 1 - Vista geral da UHE Itaipu - lago e barragens

Fonte: Curso interno VSPA (2002)

- Posição 4: casa de força (onde estão localizadas as unidades hidrogeradoras / equipamentos associados e os canais de fuga – “lado de jusante”);
- Posição 5: vertedouro (aqui, localizam-se a barragem do vertedouro, suas comportas e sua rampa de escoamento (“tobogã”)).

A “Figura 2” abaixo evidencia a dimensão do diâmetro (10,5 m) do conduto forçado (posição 1) da “Usina Hidrelétrica de Itaipu” quando comparado à estatura (1,70 m) de um ser humano (posição 2).

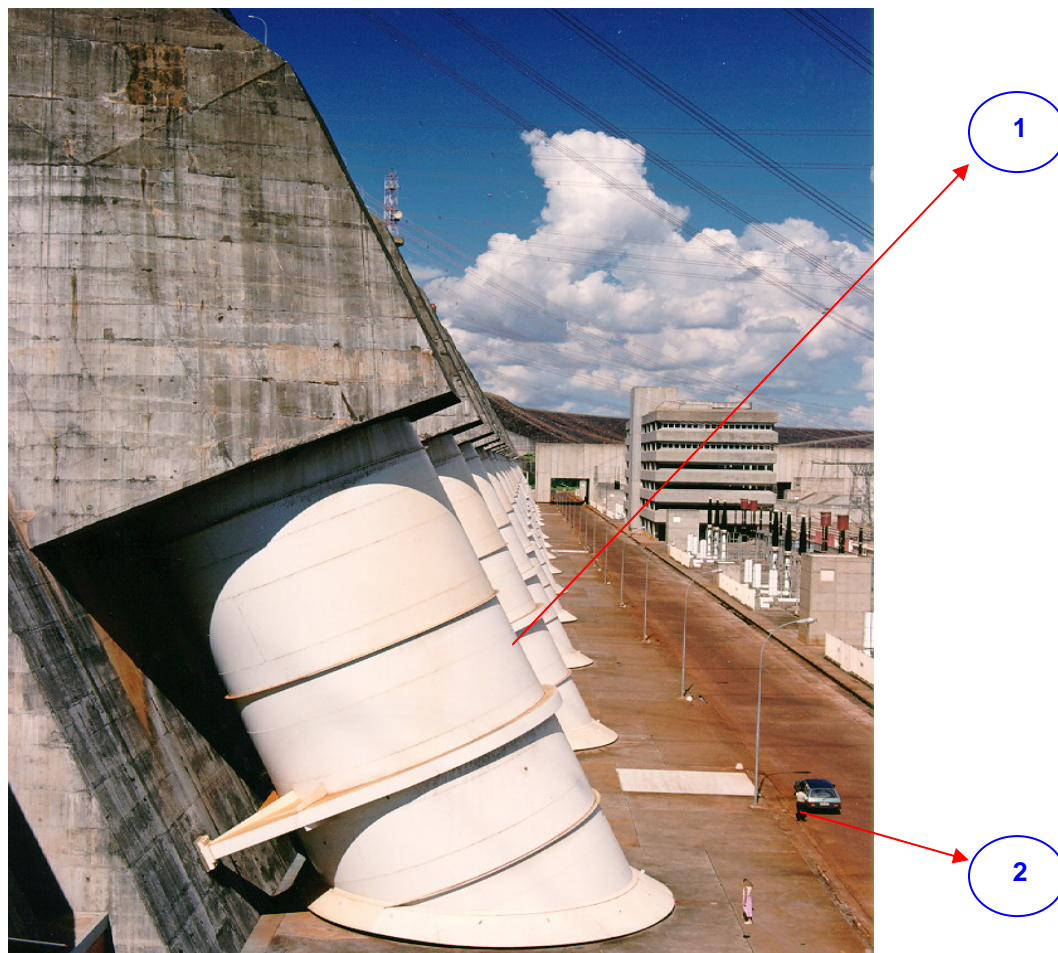


Figura 2 - Conduto forçado da UHE Itaipu

Fonte: Curso interno VSPA (2002)

* “Bloco subestação elétrica”:

No “bloco subestação elétrica associada”, em termos genéricos, localiza-se o conjunto de equipamentos de alta tensão elétrica para proteção, manobra e para medição e faturamento de energia elétrica.

Tais equipamentos são dispostos em configurações variadas dependendo da concepção da subestação elétrica que pode ser projetada nas configurações do tipo “barra simples” e

“barra dupla”, tipo “disjuntor e meio” e “anel”, etc. Destaca-se que a subestação pode ser concebida com estruturas metálicas ou de concreto, dependendo das especificações dos clientes, das tensões envolvidas e etc.

A subestação elétrica pode ser ao tempo (convencional, isolamento através do ar o que faz a SE ocupar grandes áreas, semelhante a campos de futebol) ou abrigada (com isolamento através do gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre) que, devido ao seu alto índice dielétrico, necessita de pequena área).

Pode-se dizer que a subestação elétrica é exatamente a interface entre o empreendimento hidrelétrico e o sistema elétrico (interligado ou não) externo ao mesmo.

A “Figura 3” mostra uma visão geral de uma subestação elétrica em alta tensão com os diversos equipamentos de manobra, de proteção e medição.

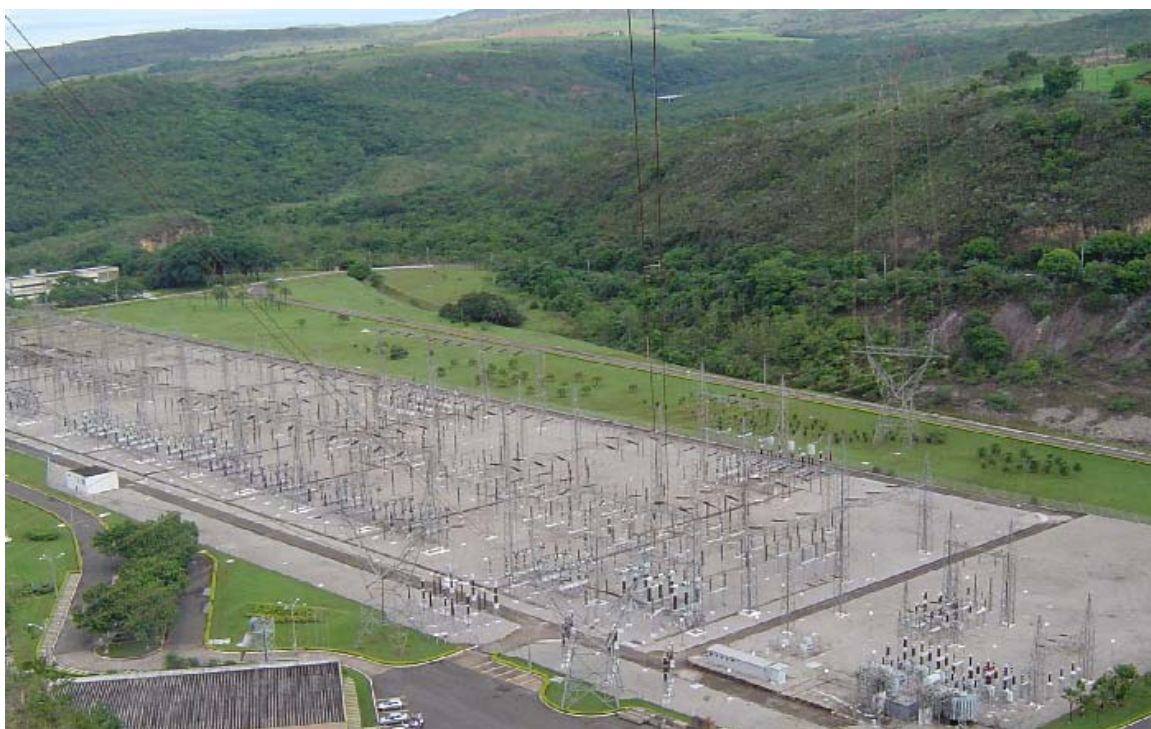


Figura 3 - Vista geral de uma subestação elétrica em alta tensão

Fonte: Curso interno VSPA (2002)

A “Figura 4” representa um disjuntor monofásico de alta tensão com 08 pólos isolados a SF₆ (posição 1), um seccionador de alta tensão aberto (posição 2), além de estruturas metálicas (posição 3) e de anéis equalizadores anti-corona (posição 4).



Figura 4 - Vista de equipamentos de uma subestação elétrica em alta tensão
Fonte: Curso interno VSPA (2002)

A interligação entre a subestação elétrica e o sistema elétrico é feita, em geral, através de linhas de transmissão de energia elétrica em alta tensão (conhecidas por “linhas longas”), as quais podem ser projetadas tanto em corrente alternada como corrente contínua e os valores de tensão elétrica são padronizados conforme normas técnicas.

Estas linhas de transmissão possuem diversas configurações, desde linha de transmissão em um ou mais circuito simples até em circuitos duplos (vide “Figuras 5 e 6”, a seguir) e suas torres de transmissão possuem diversos formatos de construção (“siluetas”) já testadas e padronizadas pelas diversas empresas de geração e de transmissão de energia elétrica.



Figura 5 - Linha de transmissão de energia elétrica em “circuito simples”

Fonte: Curso interno VSPA (2002)



Figura 6 - Linha de transmissão de energia elétrica em “circuito duplo”

Fonte: Curso interno VSPA (2002)

Tais configurações dependem, entre outros fatores, da tensão elétrica de transmissão (valor e tipo (alternada ou contínua)), da capacidade da linha de transmissão (energia elétrica a ser transmitida), do grau de redundância, do destino final da linha, das condições ambientais, etc.

As linhas de transmissão (“curta” ou “longa”), dependendo da configuração do empreendimento hidrelétrico, serão partes do escopo de fornecimento para este bloco.

Estes blocos, partes e setores estão representados na “Figura 7”, que, ilustrando um empreendimento hidrelétrico simplificado, resume o acima descrito.

Nesta figura há linhas tracejadas separando os blocos da “casa de força” e da “subestação” em alta tensão elétrica, as quais são interligadas por “linha de transmissão curta”, separando as partes “casa de força” e “tomada d’água e vertedouro”, além dos setores de “geração” e de “transformação”.

Observando a “Figura 7” abaixo, pode-se constatar que:

- A posição 1 indica a unidade hidrogeradora (composta de turbina hidráulica e gerador elétrico);
- A posição 2 indica a interligação (barramentos blindados ou cabos de média tensão) entre os terminais do gerador elétrico e os do transformador de potência elevador (posição 3);
- A posição 3 indica tanto os enrolamentos do primário (em média tensão elétrica, igual à tensão elétrica de geração) como os enrolamentos do secundário (em alta tensão elétrica, igual ao valor da tensão elétrica de transmissão) do transformador de potência elevador.
- As posições 7 e 8 indicam a “parte relativa ao conjunto tomada d’água e vertedouro”, sendo tomada d’água e vertedouro indicados pela posição 7 e o sistema de adução de água (condutos forçados ou túneis de adução) indicado pela posição 8.

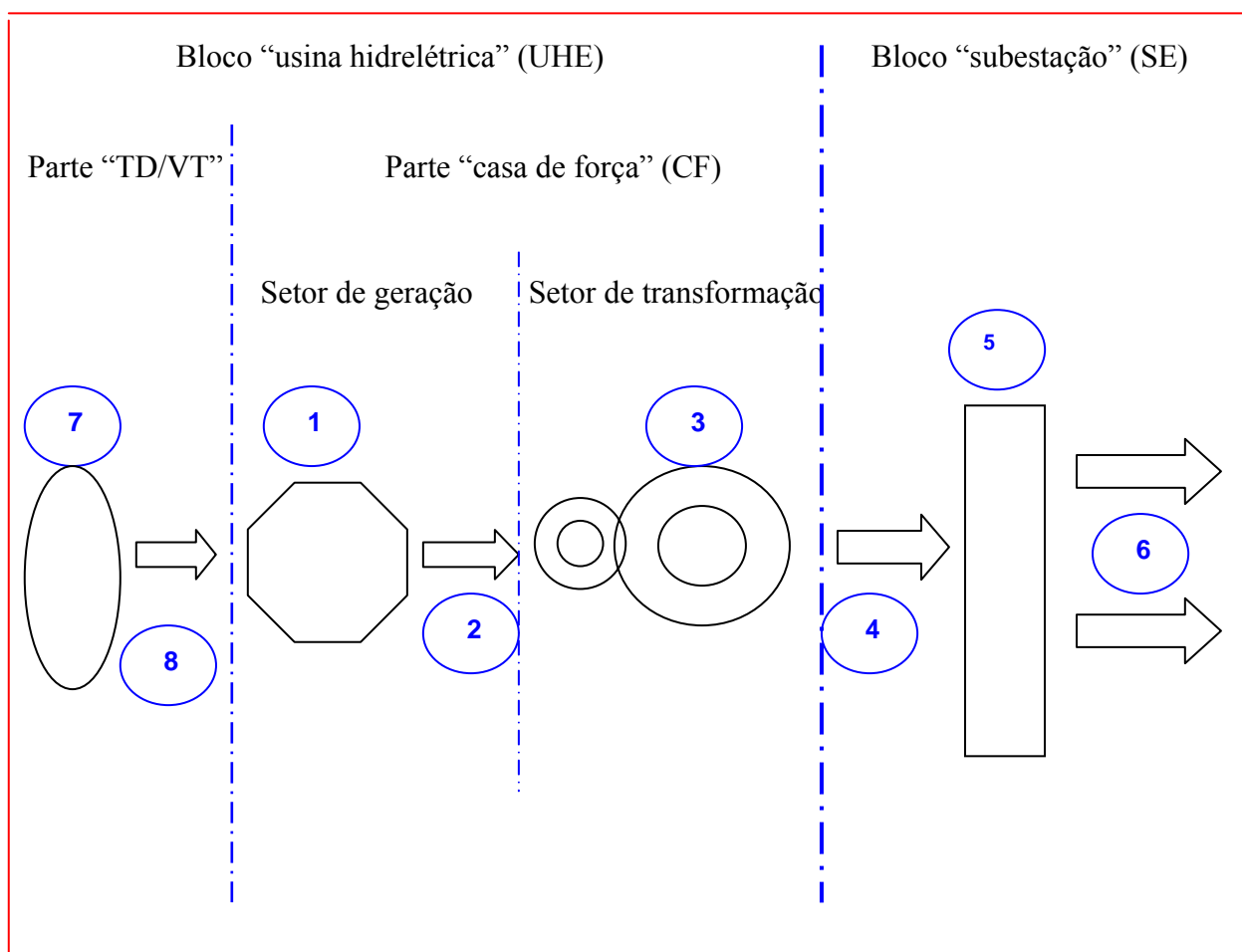


Figura 7 – Exemplo de empreendimento hidrelétrico em diagrama de blocos

Fonte: Curso interno VSPA (2002)

Desse modo, as posições 1, 2, 3, 7 e 8 representam o “bloco usina hidrelétrica”, onde as posições 1, 2 e 3 compõem a “parte relativa à casa de força” (sendo as posições 1 e 2, o “setor de geração” e a posição 3, o “setor de transformação”).

Já as linhas de transmissão de energia elétrica são indicadas pelas posições 4 (linha curta, que interliga o transformador de potência elevador à subestação elétrica em alta tensão elétrica (posição 5)) e pela posição 6 (linha longa, que interliga a subestação elétrica associada ao empreendimento hidrelétrico ao sistema elétrico externo).

O bloco “subestação elétrica” está representado pela posição 5 e pelas posições 4 (em geral) e 6 (raramente), dependendo da configuração do empreendimento elétrico no atual modelo de desverticalização das empresas de energia elétrica.

3.2.1.2. Conceito sobre turbina hidráulica

Quanto às turbinas hidráulicas, destaca-se que há diversos tipos tanto quanto aos modelos de pás de acionamento dos rotores como quanto à configuração de montagem (horizontal ou vertical) e instalação, tais como: turbinas do tipo Bulbo (submersas), tipo Kaplan, Francis, Pelton, etc.

Basicamente, o regulador de velocidade (RV) é capaz de alterar a rotação da turbina, através do controle de vazão e do ângulo de incidência do jato/fluxo hidráulico nas pás do rotor da mesma, mediante sinais e sensores, sistemas eletrônicos, óleo-dinâmico e pneumático, bem como à agulha reguladora (turbinas tipo Pelton) e ao pré-distribuidor móvel.

Assim, há a necessidade de moto-bombas para o óleo de regulação que, dependendo do tipo de turbina e de sua potência, estas moto-bombas representam cargas pesadas a serem acionadas nos diversos modos operacionais das unidades hidrogeradoras, principalmente no caso de turbinas tipo Kaplan que possuem regulação das pás rotativas.

3.2.1.3. Conceito sobre gerador elétrico

Também há vários modelos de geradores elétricos síncronos, tanto quanto ao arranjo de mancais eixo (a serem definidos a unidade hidrogeradora) como quanto à configuração de montagem que pode ser de forma horizontal, vertical ou acoplado à turbina tipo Bulbo.

Em termos gerais, o gerador é composto de uma parte rotativa (rotor) e uma parte estática (estator). No rotor é montado um enrolamento de campo (pólos) que, quando excitado e em movimento, induz tensão elétrica nos enrolamentos estatóricos e, portanto, nos terminais de fases do gerador.

Associado aos sinais e sensores, aos sistemas eletrônicos e ao transformador de excitação, o regulador de tensão (RT) é capaz de variar tensão induzida nos terminais do gerador, através da variação da intensidade da corrente de excitação no campo do gerador.

Observa-se que a conversão de energia mecânica em energia elétrica só é possível quando se tem tensão elétrica disponibilizada (gerada) e um circuito elétrico fechado, ou seja, a presença da circulação de corrente elétrica.

A escolha do modelo de turbina hidráulica a ser utilizada em um determinado empreendimento hidrelétrico, juntamente com o tipo de gerador elétrico síncrono, é função de diversos fatores.

Entre estes fatores, pode-se citar: estudo do aproveitamento; estudo do impacto ambiental; impacto em desapropriação, em atividades econômicas (agropecuária, por exemplo) e realocação de cidades, vilas e estradas; análise da navegabilidade do curso d'água; estudo de viabilidade técnico-econômico, incluindo rendimento, queda líquida e vazão de água, etc.

Independentemente dos tipos escolhidos de turbina hidráulica e gerador elétrico síncrono, a energia mecânica (potencial gravitacional ou cinética) associada à água (represada ou em movimento) será a energia motriz (mecânica) que movimentará o rotor da turbina hidráulica e o rotor do gerador elétrico síncrono.

O movimento rotacional da unidade hidrogeradora se dá devido ao fato do rotor da turbina hidráulica estar acoplado ao rotor do gerador elétrico síncrono (através de eixo de acoplamento).

Com o enrolamento de campo do gerador elétrico devidamente excitado e com um circuito elétrico fechado, haverá a circulação de corrente elétrica confirmando que a energia proveniente de uma usina hidrelétrica nada mais é que a energia mecânica associada à água convertida em energia elétrica.

As posições 6 e 7 indicam, respectivamente, os enrolamentos do estator (parte fixa do gerador elétrico) e os pólos (parte rotativa integrante ao rotor do gerador elétrico).

Após a excitação dos pólos, por uma corrente elétrica contínua, e com o movimento do rotor do gerador elétrico surgirá uma tensão elétrica alternada nos terminais de fase dos enrolamentos do estator.

3.2.2. Condições operativas das unidades hidrogeradoras

Em quaisquer usinas hidrelétricas, sempre haverá três possibilidades operativas para as unidades hidrogeradoras (turbina hidráulica acoplada ao gerador elétrico), conforme a seguir:

- * condição operativa 1: todas as unidades hidrogeradoras paradas (programadas ou não (emergência ou forçada)):

Nesta situação, o projeto deve conceber a disponibilidade de fonte de energia elétrica considerando-se o caso extremo de ausência total de energia para os serviços auxiliares elétricos da usina hidrelétrica (black-out).

Esta fonte de energia elétrica será destinada não só para a segurança da usina hidrelétrica (energia para suprir as necessidades de energia elétrica dos serviços mínimos de segurança (iluminação de emergência, alarmes, vigilância, comunicação, etc)), como também, para a partida de uma unidade hidrogeradora, desde que a mesma esteja apta para tal. Caso possível, posteriormente a partida de uma unidade, faz-se o restabelecimento da usina hidrelétrica.

- * condição operativa 2: partida da unidade hidrogeradora (independentemente se após uma parada forçada ou parada programada):

Nesta condição operativa, o projeto deverá garantir que o sistema auxiliar elétrico seja capaz de fornecer energia necessária a todos os equipamentos pertinentes ao processo de

partida de uma unidade hidrogeradora, mesmo que as demais unidades hidrogeradoras estejam fora de operação e que não haja alimentação externa (concessionária local de energia);

* condição operativa 3: parada forçada das unidades hidrogeradoras:

Neste caso, o projeto deverá conceber a disponibilidade de fonte de energia elétrica para garantir a integridade dos equipamentos durante a parada forçada.

Em quaisquer das três condições operativas acima mencionadas, percebe-se a necessidade da garantia do suprimento de energia elétrica, principalmente numa situação em que as unidades hidrogeradoras principais ou auxiliares estejam fora de operação e que não haja outra alimentação externa disponível.

Nestes casos, a instalação de fonte de energia elétrica de emergência é fundamental e imprescindível, o que confirma que sempre haverá a necessidade da previsão e da instalação de grupo motor diesel-gerador como última fonte de energia redundante.

Assim, esta fonte de energia elétrica de emergência poderá ser uma única unidade (grupo motor diesel-gerador) ou “usina diesel” (vários grupos motor diesel-gerador em paralelo), objeto desta dissertação de mestrado.

Ressalta-se que a fonte externa alternativa pode ser, por exemplo, ou oriunda da rede de distribuição (em média tensão, no valor de 13,8 kV) ou do sistema de transmissão de energia elétrica da concessionária local.

Em ambos os casos tornam-se necessários o uso de transformadores de potência abaixadores que adequarão o valor da tensão elétrica externa para o valor da tensão elétrica de trabalho (em baixa tensão elétrica) dos serviços auxiliares.

3.2.3. Sistema auxiliar elétrico

É um conjunto de equipamentos e subsistemas que, juntamente com o sistema digital de supervisão e controle, possibilita que as unidades hidrogeradoras possam disponibilizar energia elétrica nos terminais dos geradores síncronos, nos terminais dos transformadores de potência elevadores e na barra de saída da subestação elétrica de alta tensão.

Ou seja, permite que a usina hidrelétrica cumpra a sua função de gerar e disponibilizar energia elétrica. Para tal, o sistema auxiliar elétrico deve garantir suprimento de energia elétrica com segurança, confiabilidade e qualidade.

Basicamente, o sistema auxiliar elétrico é composto de dois conjuntos: um de equipamentos em corrente alternada (CA) e outro em corrente contínua (CC), os quais serão apresentados a seguir de um modo geral, porém, dando-se uma maior ênfase aos equipamentos em corrente alternada.

3.2.3.1. Em corrente alternada

Este conjunto é composto por transformadores de potência abaixadores auxiliares; por painéis de distribuição geral (PDG) e de carga (centro de comando de motores (CCM)), por painéis de iluminação e tomadas (PL), painéis de alimentação externa (PEXT); por cubículos de manobra (em média tensão elétrica) e grupo motor diesel-gerador de emergência.

3.2.3.1.1. Transformador de potência abaixador auxiliar

O transformador de potência abaixador auxiliar (TRA) localiza-se na plataforma dos transformadores elevadores, externa à casa de força (quando projetado do tipo “à óleo”) ou interno à casa de força (quando projetado do tipo “à seco”).

A função destes transformadores auxiliares é “drenar” energia elétrica dos terminais de fases das unidades geradoras elétricas e, posteriormente, disponibilizá-la aos painéis de distribuição geral de energia elétrica em corrente alternada, conforme será explanado e ilustrado (“Figura

15”) no item 3.5 desta dissertação. A energia distribuída, dependendo da potência requerida pelas cargas dos serviços auxiliares, pode ser diretamente em baixa tensão (BT) ou primeiramente em média tensão e posteriormente “transformada” em baixa tensão elétrica.

Estes transformadores representam, na maioria dos projetos, as fontes primárias internas de energia elétrica (que serão apresentados no item 3.5.1. desta dissertação) para os serviços auxiliares elétricos (SAE) da usina hidrelétrica e “abaixam” a média tensão elétrica ao valor da baixa tensão elétrica alternada usada nos serviços auxiliares elétricos.

Conforme as características do projeto (corrente elétrica nominal primária dos transformadores auxiliares), estes transformadores podem ser conectados às fases dos geradores elétricos principais ou através de cabos de média tensão elétrica ou de barramentos blindados. Destaca-se que os barramentos blindados podem ser de fases isoladas, de fases segregadas ou de fases não segregadas.

A “Figura 9”, abaixo, mostra um trecho de barramento blindado de fase isolada onde a posição 1 representa o invólucro, a posição 2 indica o condutor propriamente dito e a posição 3, os isoladores que também exercem a função de fixação.

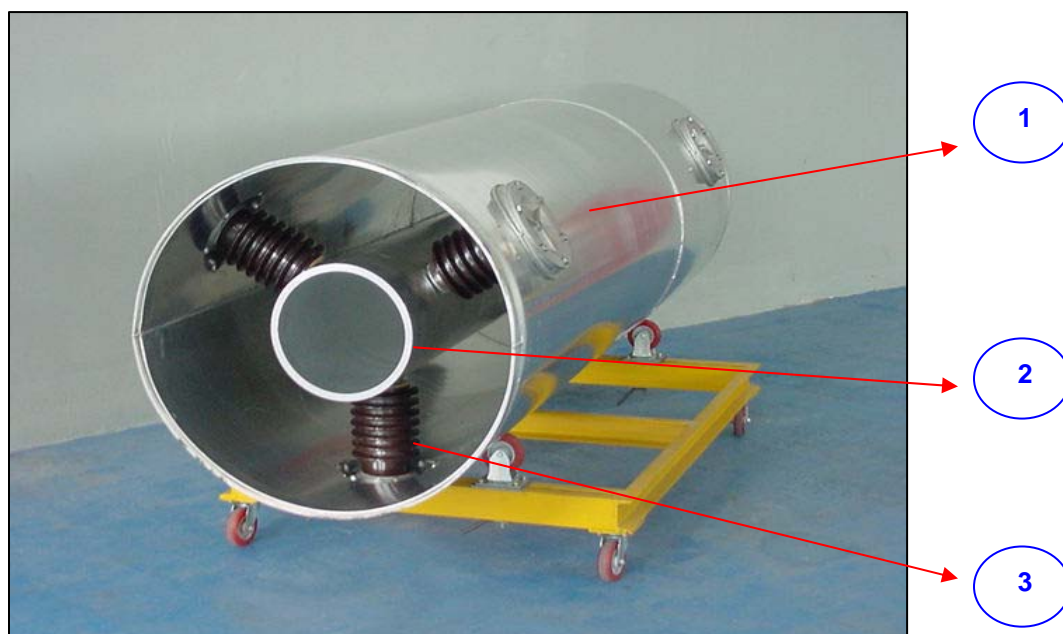


Figura 9 - Barramento blindado de fases isoladas - vista monofásica
Fonte: Megabarre (VSPA - curso interno 2002)

A “Figura 10” a seguir, ilustra as três fases do barramento blindado de fases isoladas da saída do “housing” do gerador elétrico. Ressalta-se que “housing” é o termo dado ao invólucro de concreto (em geral para as unidades hidrogeradoras verticais) que “abriga” o gerador elétrico.



Figura 10 - Barramento blindado de fases isoladas - vista trifásica
Fonte: VSPA (curso interno - 2002)

Destaca-se que ainda há empreendimentos que não possuem os transformadores de potência abaixadores auxiliares e, sim, somente unidades hidrogeradoras auxiliares do tipo “pequena central hidrelétrica” (PCH).

Neste caso, o grupo motor diesel-gerador é usado como fonte de emergência para os serviços auxiliares eletromecânicos destas unidades hidrogeradoras auxiliares, além dos serviços mínimos de segurança (iluminação de emergência, alarmes, vigilância eletrônica, comunicação, etc).

Naturalmente, as filosofias de operação e de redundância para os serviços auxiliares eletromecânicos das usinas hidrelétricas são bem diversas e variam para cada projeto. Por exemplo, podem-se ter usinas hidrelétricas que possuem transformadores de potência abaixadores auxiliares e, como retaguarda, fonte de energia elétrica externa (concessionária local) ou unidades hidrogeradoras auxiliares. Em quaisquer configurações, sempre haverá fonte de energia elétrica de emergência, ou seja, grupo motor diesel-gerador.

3.2.3.1.2. Painéis de distribuição geral e de carga

Os painéis de distribuição geral (independentemente do tipo de fonte – vide item 3.5 desta dissertação) sempre irão distribuir a energia elétrica oriunda das fontes de energia para os serviços auxiliares elétricos, ou seja, aos demais painéis de carga, centros de comando de motores e painéis de iluminação e tomadas dispostos nos diversos pisos da casa de força da usina hidrelétrica.

Esta distribuição de energia elétrica pode ser feita em baixa tensão elétrica diretamente aos demais painéis. Ou, dependendo da potência requerida pelos serviços auxiliares elétricos e dos critérios de projeto e de dimensionamento, a energia é distribuída inicialmente em média tensão e, após “abaixamento”, a energia elétrica é disponibilizada aos diversos painéis e aos centros de comando de motores da usina e subestação.

Convém ressaltar que, dependendo das distâncias envolvidas, os serviços auxiliares elétricos da subestação elétrica, do vertedouro e da tomada dá água também podem ser “alimentados” diretamente em baixa tensão elétrica a partir dos painéis de distribuição geral da casa de força.

Se as quedas de tensão forem consideráveis (o que levaria ao aumento das “bitolas” dos cabos) pode-se usar linha de distribuição elétrica em média tensão para transmitirem a energia do painel de distribuição geral (saída em baixa tensão) até a subestação.

Para tal, usam-se transformadores de distribuição elevadores e abaixadores, em cada extremidade. Também, dependendo do projeto, usa-se alimentação externa que, em geral, é em média tensão, com posterior “transformação” para baixa tensão elétrica.

Normalmente, a distribuição é feita em baixa tensão elétrica. Neste caso, os painéis de distribuição geral possuem disjuntores trifásicos motorizados e extraíveis “de entrada” de energia, além de serem específicos para cada uma das possibilidades de fontes de energia (as internas, as externas ou a fonte de emergência).

Possuem, também, disjuntores de saída e lógica de transferência automática, além de dispositivos de supervisão, medição, proteção e controle.

Os disjuntores de entrada são eletricamente intertravados de tal forma que não haja paralelismo de duas fontes de energia nos painéis de distribuição geral e que esta condição permaneça durante e após a transferência automática das fontes.

A “figura 11” abaixo ilustra um disjuntor de entrada trifásico (posição 1), sendo montado em um painel, com seus respectivos transformadores de corrente do tipo janela (posição 2) que estão instalados em cada uma das barras das fases de entrada do disjuntor trifásico para proteção de sobrecorrente.

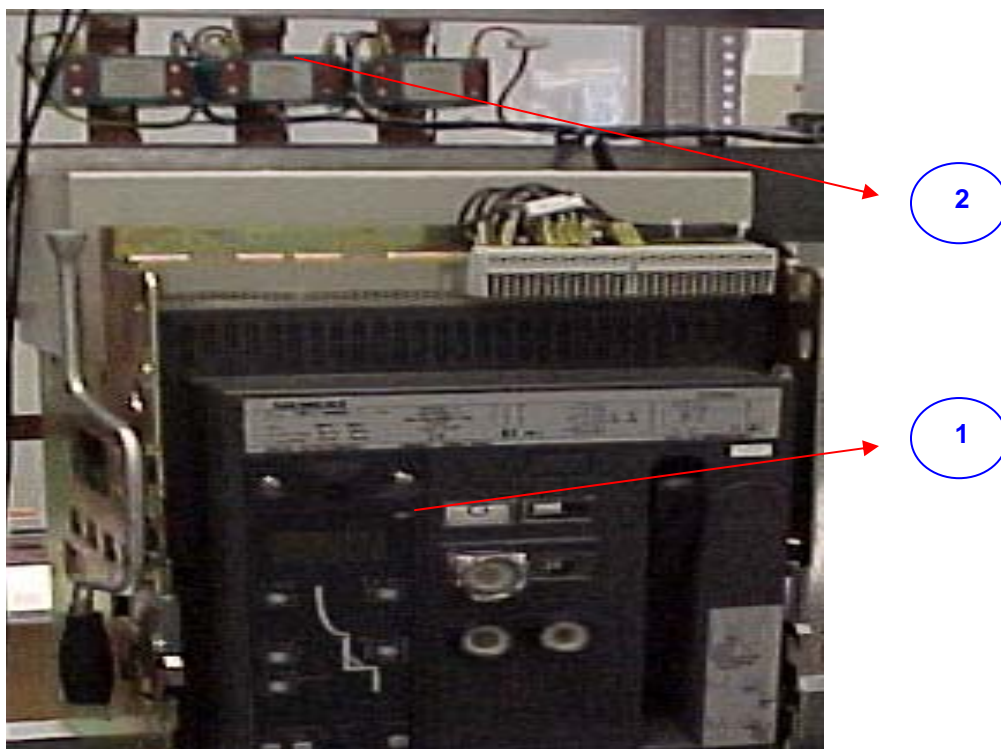


Figura 11 – Vista de um disjuntor trifásico em baixa tensão elétrica
Fonte: VSPA (curso interno – 2002)

Os painéis de distribuição geral podem ser projetados com barras simples ou concebidos com barra dupla (com disjuntor de acoplamento e com opcional segregação de cargas essenciais de não essenciais).

No caso da utilização de “usina diesel”, como último recurso de fonte de energia para os serviços auxiliares elétricos, o paralelismo de seus grupos motor diesel-gerador não deve ocorrer no painel de distribuição geral.

Este paralelismo deve ocorrer no painel do grupo diesel (PGD) que é um painel de comando automático local do grupo motor diesel-gerador e no seu correspondente painel de sincronismo (PSIN).

Quanto aos centros de comando de motores, os mesmos são painéis compostos de colunas de entradas de energia elétrica e com lógica de transferência destas entradas através de disjuntores motorizados para cada entrada, devidamente intertravados para se evitar o paralelismo de fontes de energia.

Os centros de comando de motores podem ser concebidos com barras simples ou com barras duplas interligadas por disjuntores de acoplamento longitudinal e são divididos em CCM das unidades hidrogeradoras (visa atender as cargas das unidades) e CCM para as demais cargas e de serviços gerais (tais como compressores de ar, bombas de drenagem e bombas de esvaziamento, etc).

Além disso, há uma série de “gavetas” (também conhecidas por demarradores) projetadas para acionamento de motores.

Estas gavetas englobam dispositivos de comando, proteção e sinalização, entre outros, e possuem dimensões variadas dependendo da potência requerida pelas cargas motrizes a serem supridas pelas gavetas em questão.

A “Figura 12” apresenta uma vista geral de um centro de comando de motores onde são indicadas as colunas de entrada das fontes de energia elétrica (posição 1) e as “gavetas” ou demarradores (posição 2).

Eventualmente, também há saídas de tensão elétrica para alimentação de cargas não motrizes ou para alimentação de demarrador instalado localmente ao motor elétrico.



Figura 12 - CCM - vista geral
Fonte: VSPA (curso interno – 2002)

Para o caso de “colapso” no abastecimento de energia aos serviços auxiliares elétricos e para se evitar grupo motor diesel-gerador de grande potência é necessária a realização de um sistema de alívio de cargas (vide item 4.2.2.). Neste sistema, somente as cargas essenciais (vide item 3.4.2.) serão “alimentadas” pelo grupo motor diesel-gerador.

Para tal, a segregação de cargas essenciais das não essenciais é feita de diversos modos, ou projetando-se com o conceito de barras duplas ou com um “sistema de alívio de cargas”.

No caso de barras duplas, tem-se uma barra para cargas essenciais e outra barra para cargas não essenciais e esta segregação pode ser feita tanto no painel de distribuição geral como nos centros de comando de motores (que é o mais comum - vide “Figura 15”).

No caso de “sistema de alívio de cargas”, esta segregação é feita através de lógica de relés, isto é, não é feita em barras distintas. Logo, poderá haver cargas essenciais em ambas as barras, conforme será apresentado no exemplo de operação de usina diesel (vide item 4.2 desta dissertação).

O “sistema de alívio de cargas” será acionado assim que os comandos de partida dos grupos motor diesel-gerador são dados e é efetivado quando os grupos motor diesel-gerador são

conectados aos painéis de distribuição geral (fechamento dos disjuntores de entrada referentes aos grupos motor diesel-gerador).

3.2.3.1.3. Painéis de Iluminação e Tomadas

São painéis responsáveis para os circuitos de distribuição de iluminação e tomadas dispostas por toda a usina, também em forma de quadros locais de iluminação e tomadas gerais.

3.2.3.1.4. Pannel de alimentação externa

Através deste painel, é feita a interface entre a alimentação proveniente da concessionária local de energia elétrica, normalmente em média tensão elétrica, e os painéis de distribuição geral.

Este painel de alimentação externa possui disjuntor de entrada motorizado e extraível além de seccionador (sob carga) com fusíveis para manobra e proteção do primário do transformador auxiliar abaixador. Para os casos de mais de uma entrada, também são intertravados eletricamente para se impedir o paralelismo das fontes de energia elétrica.

Além dos dispositivos de proteção e manobra, também possuem sistema de medição e faturamento da energia elétrica adquirida externamente, o qual deve atender aos requisitos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

3.2.3.1.5. Grupo motor diesel-gerador

Representa um motor diesel acoplado a um gerador elétrico, cuja finalidade é a geração de energia elétrica como fonte de energia emergencial às cargas essenciais da usina hidrelétrica.

No item 3.6 será apresentado um detalhamento maior do grupo motor diesel-gerador.

3.2.3.2. Em corrente contínua

Para se garantir o suprimento de energia elétrica às cargas que não podem ser desligadas (as que necessitam de “energia firme”) e que são “alimentadas” por tensão elétrica alternada ou

por tensão elétrica contínua, tem-se que projetar um sistema capaz de fornecer energia de forma ininterrupta, confiável, segura e de qualidade.

Estas cargas são as bobinas de abertura e de fechamento de equipamentos de proteção e manobra; os relés de proteção; cargas referentes à iluminação de emergência e às sinalizações; as cargas relativas aos alarmes de um modo geral e à segurança; cargas referentes às fontes de energia aos painéis do sistema digital de supervisão e controle bem como à área de telecomunicação, teleproteção e de transmissão de dados, comandos, voz e imagem.

Para tal, o sistema auxiliar em corrente contínua é composto, entre outros, por: painéis de distribuição geral e painéis de cargas; por grupos de conjuntos de baterias estacionárias (vide “Figura 13”) e carregadores de baterias (retificadores ou conversores de corrente alternada para corrente contínua), além de baterias para o sistema de comunicação.



Figura 13 - Banco de baterias estacionárias
Fonte: VSPA (curso interno – 2002)

Também compõem este sistema, os inversores (conversores de corrente contínua para corrente alternada), as fontes ininterruptas de energia (“no-break”) e os painéis de iluminação de emergência e sinalização.

Assim, mesmo na ausência total de energia elétrica alternada (inclusive a proveniente do grupo motor diesel-gerador), a usina hidrelétrica possuirá condições mínimas operativas para proteção, telecomunicação, teleproteção e para ações emergenciais.

Naturalmente, esta fonte de energia elétrica será por um tempo adequado às necessidades concebidas para a usina hidrelétrica e ao sistema em corrente contínua, cujo dimensionamento é específico para cada caso de projeto.

Caso o grupo motor diesel-gerador esteja em operação como fonte de energia de emergência, além de assumir as cargas essenciais e motrizes, também alimentará os carregadores dos conjuntos de baterias.

Dependendo da concepção do empreendimento, o sistema de corrente contínua deve prever que cargas que necessitem de “energia firme” em corrente alternada sejam também “alimentadas” pelo sistema “bateria-inversor” e, naturalmente, que as cargas que requerem “energia firme” em corrente contínua sejam alimentadas diretamente pelo conjunto de baterias.

A seguir serão conceituados os serviços auxiliares elétricos.

3.2.4 Serviços auxiliares elétricos

3.2.4.1. Introdução

É uma parte do sistema auxiliar elétrico, notadamente composta pelos painéis de uma forma geral (tanto em corrente alternada como em corrente contínua).

Portanto, incluem-se os painéis de distribuição geral, os painéis de iluminação e tomadas e os centros de comando de motores de toda a usina, ou seja, da casa de força, da tomada d’água e vertedouro, das áreas externas e da subestação associada à usina hidrelétrica.

É este conjunto de painéis que disponibiliza a chegada da energia elétrica em corrente alternada (ou em corrente contínua) às diversas cargas necessárias para proteção, transmissão

de dados, comando, controle e operação, partida e parada das unidades hidrogeradoras.

3.2.4.2. Importância dos serviços auxiliares elétricos

Em complemento às abordagens de usina hidrelétrica, feita no item 3.2. (desta dissertação), ressalta-se que, independentemente dos tipos de turbina hidráulica e de gerador elétrico escolhidos, a energia mecânica (potencial gravitacional ou cinética) associada à água (represada ou em movimento) será a energia motriz (mecânica) que movimentará o rotor da turbina hidráulica.

Devido ao fato do rotor da turbina estar acoplado ao gerador elétrico síncrono (através de eixo da unidade hidrogeradora), o rotor do gerador também iniciará rotação. Com o enrolamento de campo excitado e com circuito elétrico “fechado” pode-se dizer que a energia hidrelétrica nada mais é que energia mecânica associada à água convertida em energia elétrica requerida pela carga conectada no circuito elétrico “fechado”.

Naturalmente, como há partes rotativas, faz-se necessário o uso de mancais com segmentos de metal patente ou de teflon para “guiar” a rotação do eixo (mancais guia) e para “escorar” o conjunto rotativo quando parado (mancal escora).

Além dos mancais, há freios e dispositivos de levantamento para o início de movimento, dependendo do projeto. Assim, o conjunto rotativo é praticamente composto pelo rotor da turbina, pelo rotor do gerador, além do eixo de acoplamento.

Devido ao atrito e ao calor os segmentos dos mancais sofreriam desgastes e aquecimentos caso não houvesse uma lubrificação e troca de calor. Assim, os segmentos dos mancais são imersos em cubas de óleo que, além da função de lubrificação, também servirá de meio para troca de calor gerado pelo atrito e rotação.

Desse modo, o calor gerado pelo atrito entre o eixo e os segmentos dos mancais é transferido ao óleo, que, aquecido, necessitará de troca de calor. Há diversos tipos de troca de calor do óleo dos mancais, desde a troca natural como a troca forçada (via trocador de calor e bombas de circulação).

Portanto, dependendo do arranjo, há necessidade de moto-bomba para circulação e injeção do óleo, bem como para circulação de água de refrigeração para a unidade hidrogeradora. Além do mais, como o regulador de velocidade altera a rotação da turbina, através do controle de vazão e do ângulo de incidência do jato/fluxo hidráulico nas pás do rotor da mesma (utilizando sistema óleo-dinâmico e pneumático), é necessário o uso de moto-bombas para o óleo de regulação.

Outras cargas que merecem destaques são as cargas referentes às bombas de acionamento das comportas do vertedouro, principalmente no levantamento das mesmas (na necessidade de se verter água) e as cargas referentes às bombas de drenagem e de esvaziamento.

São exatamente estas cargas (relativas à integridade dos mancais e à regulação da turbina, referentes às bombas de drenagem e às centrais óleo-dinâmicas das comportas do vertedouro, entre outras) que necessitam de suprimento de energia elétrica.

Desse modo, no projeto da planta hidrelétrica deve estar assegurada a disponibilidade de fontes de energia elétrica com confiabilidade e redundância, inclusive a necessária fonte de emergência (grupo motor diesel-gerador), razão desta dissertação de mestrado.

Tal fato visa garantir a integridade das unidades hidrogeradoras, inclusive no caso de ocorrência que promova a retirada da excitação dos geradores hidrelétricos (eliminação da tensão elétrica nos terminais dos mesmos).

Porém, de nada adiantariam as fontes de energia elétrica redundantes se os painéis dos serviços auxiliares elétricos (com seus múltiplos dispositivos de supervisão, sinalização e alarme, de comando de força, de proteção e acionamento) não forem dimensionados ou se não estiverem aptos para entregar esta energia às cargas gerais e, principalmente, às cargas essenciais, no caso de uma contingência.

Assim, está evidenciada a importância dos serviços auxiliares elétricos na usina hidrelétrica.

3.3. CARGAS ELÉTRICAS SUPRIDAS PELOS SERVIÇOS AUXILIARES ELÉTRICOS

3.3.1. Introdução

Normalmente, as cargas elétricas supridas pelos serviços auxiliares elétricos são todas as cargas (motrizes e não motrizes) que a usina hidrelétrica possui, incluindo aqui as cargas da casa de força e da subestação, as da tomada d'água e do vertedouro, além de cargas das áreas externas e das barragens.

Estas cargas elétricas (quantidades, tipos e potência) dependem diretamente de cada projeto, ou seja, do tipo de arranjo da turbina e do gerador, das condições ambientais, tipo e local da usina hidrelétrica (caverna, bulbo, etc), de sua função no sistema elétrico, do grau de redundância do projeto, das distâncias entre a casa de força, tomada d'água, vertedouro e subestação, etc.

Nas “Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3” foram indicadas, a título de exemplo, algumas cargas, tanto de forma qualitativa como quantitativa, da unidade hidrogeradora, da subestação, do vertedouro e cargas gerais para uma usina hidrelétrica composta de turbinas “tipo Kaplan”.

Neste contexto, complementarmente às “Tabelas” acima citadas, as cargas elétricas a serem supridas pelos serviços auxiliares elétricos podem ser agrupadas em: cargas da casa de força, cargas da subestação elétrica e cargas da tomada d'água / vertedouro, conforme a seguir:

3.3.2. Cargas elétricas da casa de força

Neste caso, as diversas cargas elétricas da casa de força podem ser agrupadas em cargas das unidades e dos compressores, cargas dos auxiliares mecânicos e elétricos gerais, cargas do sistema de ventilação e do sistema de iluminação / tomadas.

- Cargas das unidades hidrogeradoras e dos transformadores elevadores:

Tais como, bombas de circulação e injeção de óleo dos mancais, bomba de regulação e de levantamento, cargas dos reguladores de tensão (“escorva” do campo e ventiladores) e de velocidade, dos resistores de aquecimento e refrigeração dos transformadores, etc;

- Cargas dos compressores:

Inclui os compressores do ar de regulação além do ar de serviço e do ar de rebaixamento (caso seja prevista a operação do gerador como compensador síncrono para compensação de reativos do sistema elétrico);

- Cargas dos auxiliares mecânicos;

São as cargas referentes às bombas de drenagem e esvaziamento, às válvulas motorizadas, ao sistema de tratamento de água e esgoto, aos elevadores e às oficinas bem como as cargas referentes aos equipamentos hidromecânicos e de levantamento (incluindo as pontes rolantes e talhas motorizadas);

- Cargas do sistema de ventilação:

São as cargas relativas aos ventiladores e exaustores, ao sistema de ar condicionado e aos desumidificadores.

- Cargas do sistema de iluminação e tomadas:

São constituídas pelas cargas referentes ao sistema de iluminação e tomadas gerais, de serviços e das unidades hidrogeradoras.

- Cargas dos auxiliares elétricos gerais:

São as requeridas pelos carregadores de baterias, pelos inversores, filtro prensa, pelas cargas relativas ao sistema de aquecimento da água de arrefecimento ou do óleo dos grupos motor diesel-gerador (vide item 3.6) e etc.

3.3.3. Cargas elétricas da subestação elétrica

Neste caso, são englobadas todas as cargas da subestação elétrica, tais como: carregadores de baterias e inversores; telecomunicação e teleproteção; iluminação e tomadas; sistema de ventilação, sistemas de exaustão e de ar condicionado; motorização e aquecimento de disjuntores e seccionadores de alta tensão.

3.3.4. Cargas elétricas da tomada d'água e do vertedouro

Similarmente à subestação elétrica, estas cargas são agrupadas em bombas das centrais óleo-dinâmicas das comportas, cargas de iluminação e tomadas; limpa grades, etc.

3.4. CRITÉRIOS PARA CARGAS ELÉTRICAS E PARA DEMANDAS

3.4.1. Introdução

A soma das potências das cargas elétricas (conforme antes mencionadas) das usinas hidrelétricas representa a potência total instalada, mas não a potência total demandada, ou seja, analogamente a uma residência ou qualquer outro estabelecimento, há cargas que não estarão simultaneamente em operação e, portanto, energizadas.

Neste contexto, é comum a divisão destas cargas elétricas em basicamente três tipos: cargas essenciais, cargas permanentes e cargas de ponta. Também, classifica-se a demanda em 03 tipos: demanda instantânea, demanda média e demanda máxima.

Ressalta-se que os critérios para esta classificação de cargas e de demanda máxima podem variar dependendo dos critérios de dimensionamento das projetistas, do fornecedor e do cliente, além das exigências do empreendimento hidrelétrico. A título de exemplo, tem-se:

3.4.2. Cargas essenciais

São as cargas imprescindíveis para se garantir a integridade dos equipamentos e da usina hidrelétrica em quaisquer condições operativas, ou seja, partidas e paradas (forçadas ou não) das unidades hidrogeradoras além da situação de máquinas paradas.

Como exemplo, tem-se o seguinte: cargas referentes à bomba de injeção de óleo dos mancais, à bomba do regulador de velocidade e do tanque de óleo de infiltração; cargas relativas ao sistema de resfriamento dos geradores e à pressurização do barramento blindado; cargas dos painéis dos reguladores de velocidade e de tensão (escorva do campo e refrigeração das pontes tiristorizadas).

Têm-se, ainda, carga referente aos sistemas de aquecimento da água de arrefecimento e do óleo do grupo motor diesel-gerador, além das cargas relativas aos carregadores de baterias, aos inversores e à exaustão das salas de baterias.

Também há cargas referentes ao sistema de resfriamento dos transformadores de potência elevadores; ao sistema de telecomunicação e proteção (motores de disjuntores e seccionadores de alta tensão); cargas relativas às comportas do vertedouro e, dependendo dos critérios de definição de cargas essenciais, há cargas relativas às comportas da tomada d'água e aos compressores do ar de regulação.

A “Figura 14” ilustra a importância do sistema de exaustão da sala das baterias estacionárias que, caso seja inadequada, poderá impedir a correta extração do gás exalado das baterias que, na presença de uma faísca qualquer (como um simples acionamento de interruptor, por exemplo), poderá passar pelo processo de combustão e explosão.



Figura 14 - Sala de baterias estacionárias com exaustão inadequada
Fonte: VSPA (curso interno – 2002)

Também há cargas referentes ao sistema de resfriamento dos transformadores elevadores; à telecomunicação e à proteção (motores de disjuntores e seccionadores de alta tensão); cargas relativas às comportas do vertedouro e, dependendo de critérios, às comportas da tomada

d'água e aos compressores do ar de regulação.

3.4.3. Cargas permanentes

São consideradas cargas permanentes as cargas que ou estão sempre energizadas ou estarão energizadas por um tempo longo (em geral, considerado ou acima de uma hora ou acima de duas horas de funcionamento);

3.4.4. Cargas de ponta

Contraopondo às cargas permanentes, as cargas de ponta são energizadas por pouco tempo (ou até uma hora ou até duas horas de funcionamento, em geral), como exemplo, as bombas de esvaziamento;

3.4.5. Demanda instantânea e demanda média

Considera-se como demanda instantânea a potência nominal ativa (P_N), em kW, “disponibilizada” pela carga, ou seja, no caso de motor, a potência “entregue” na ponta do eixo do mesmo. Portanto, descontando-se as perdas no processo, isto é, considerando o rendimento (η) do motor.

O conceito de demanda média nada mais é que a potência nominal aparente (S_N), em kVA, ou a efetiva potência total que a carga requer da fonte de energia elétrica (potência consumida (P_C)). Em outras palavras, sem o desconto das perdas no processo.

A equação (1) abaixo indica esta potência e evidencia o caráter fasorial da mesma (j), uma vez que se devem ser levados em conta a potência reativa, onde aplicável (Q , cuja unidade é kVAr) e o fator de potência da carga ($\cos \varphi$):

$$S_N = P_C + j \cdot P_C / \operatorname{tg} \varphi \quad \text{equação (1)}$$

Estes valores são imprescindíveis para o dimensionamento do grupo motor diesel-gerador.

Assim, considerando-se:

- A classificação de cargas acima;
- A classificação de demanda acima;
- A relação entre as correntes de partida (I_P) e nominal (I_N) dos motores, ou seja, I_P/I_N ;
- Os critérios de projeto e
- As condições operativas das unidades hidrogeradoras;

o dimensionamento do grupo motor diesel-gerador, quer seja na configuração “grupo singelo” ou na configuração “usina diesel”, pode ser efetuado conforme a orientação geral abaixo:

- Para o cálculo do motor a diesel: neste caso, é utilizado o valor total de demanda instantânea (em kW).
- Para o cálculo do gerador elétrico síncrono: neste caso, é utilizado o valor total de demanda média (em kVA).

As tabelas seguintes, como exemplos, ilustram valores aproximados de cargas de uma unidade hidrogeradora (“Tabela 3.1”); as cargas de uma subestação de alta tensão elétrica (“Tabela 3.2”); as cargas de um vertedouro e cargas gerais da usina hidrelétrica (“Tabela 3.3”).

Nestas tabelas, não estão indicadas as cargas referentes aos demais equipamentos, tais como: hidromecânicos e de levantamento, ar condicionado e ventilação das diversas áreas da usina.

Tabela 3.1 – Exemplo de lista de cargas de uma unidade hidrogeradora - com turbina tipo “Kaplan”

Qtde.	Descrição da carga Carga por unidade	dados técnicos P_N (kW) $\cos \varphi$ η			Demanda instantânea (em kW)			Demanda média (em kVA)		
					Situação da unidade / tempo			Situação da unidade / tempo		
					parada contínuo	partindo 5 min	parando 10 min	parada contínuo	partindo 5 min	parando 10 min
02	Bomba circulação de óleo - Mancal guia gerador	2,0				2,0				
02	Bomba circulação de óleo - Mancal guia turbina	2,0				2,0				
02	Bomba circulação de óleo - Mancal combinado	50,0				50,0				
02	Bomba de injeção de óleo -	30,0				30,0	30,0			
02	Bomba principal - Regulador da turbina	160,0				160,0				
01	Bomba secundária - Regulador da turbina	80,0			80,0	80,0	80,0			
01	Bomba de coleta de óleo - Servomotor	2,0								

Continua...

Continuação...

Tabela 3.1 – Exemplo de lista de cargas de uma unidade hidrogeradora - com turbina tipo “Kaplan”

Qtde.	Descrição da carga Carga por unidade	dados técnicos P_N (kW) $\cos \varphi$ η	Demanda instantânea (em kW)			Demanda média (em kVA)		
			Situação da unidade / tempo			Situação da unidade / tempo		
			parada contínuo	partindo 5 min	parando 10 min	parada contínuo	partindo 5 min	parando 10 min
02	Bomba de drenagem - Tampa da turbina	1,0	1,0	1,0	1,0			
01	Bomba de levantamento	5,0						
01	Resistores de aquecimento - Gerador	25,0						
01	Exaustor de vapor de óleo - Mancais	2,0						
02	Bomba de vedação - Eixo da turbina	6,0						
01	Transformador elevador	25,0			25,0			
01	Painel regulador turbina	1,0		1,0				

Continua...

Continuação...

Tabela 3.1 – Exemplo de lista de cargas de uma unidade hidrogeradora - com turbina tipo “Kaplan”

Descrição da carga		dados técnicos			Demanda instantânea (em kW)			Demanda média (em kVA)		
					Situação da unidade / tempo			Situação da unidade / tempo		
					parada	partindo	parando	parada	partindo	parando
Qtde.	Carga por unidade	P_N (kW)	$\cos \varphi$	η	contínuo	5 min	10 min	contínuo	5 min	10 min
01	Sistema de excitação - Escorva do campo	5,0				5,0	5,0			
01	Sistema de excitação - Ventiladores	4,0				4,0				
01	Sistema digital de Supervisão e controle	2,0			2,0	2,0	2,0			

Fonte: VSPA (curso interno - 2002)

Legenda: Qtde. (quantidade); P_N (potência ativa nominal disponível); $\cos \varphi$ (fator de potência da carga) e η (rendimento da carga)

Tabela 3.2 – Exemplo de lista de cargas de uma subestação de alta tensão - associada a uma Usina hidrelétrica

Qtde.	Descrição da carga Carga por unidade	dados técnicos P_N (kW) $\cos \varphi$ η			Demanda instantânea (em kW)			Demanda média (em kVA)		
					Situação da unidade / tempo			Situação da unidade / tempo		
					parada contínuo	partindo 5 min	parando 10 min	parada contínuo	partindo 5 min	parando 10 min
03	Conversor CA – CC	20,0			40,0	40,0	40,0			
02	Inversor CC-CA	10,0			10,0	10,0	10,0			
01	Quadro Telecomunicação	1,0			1,0	1,0	1,0			
01	SDSC	2,0			2,0	2,0	2,0			
01	Quadro iluminação	30,0								
26	Motores dos seccionadores	1,0								
08	Motores dos disjuntores	3,0								
26	Aquecimento dos seccionadores	0,2			5,2	5,2	5,2			
08	Aquecimento dos disjuntores	1,5			12,0	12,0	12,0			
02	Ar condicionado sala controle	10,0								
02	Ar condicionado telecomunicação	3,0								
02	Exaustores da sala de baterias	1,0			1,0	1,0	1,0			

Fonte: VSPA (curso interno - 2002)

Legenda: Qtde. (quantidade); P_N (potência ativa nominal disponível); $\cos \varphi$ (fator de potência da carga) e η (rendimento da carga)

Tabela 3.3 – Exemplo de lista de cargas do vertedouro e cargas gerais - de uma Usina hidrelétrica

Qtde.	Descrição da carga Carga por unidade	dados técnicos P_N (kW) $\cos \varphi$ η			Demanda instantânea (em kW)			Demanda média (em kVA)		
					Situação da unidade / tempo			Situação da unidade / tempo		
					parada contínuo	partindo 5 min	parando 10 min	parada contínuo	partindo 5 min	parando 10 min
20	Bomba da central óleo-dinâmica da comporta do vertedouro	7,0								
01	Compressores de ar de serviço	25,0								
01	Pórtico rolante	60,0								
01	Quadro de iluminação	40,0								
01	circuito de tomadas	40,0								
03	Bomba de drenagem casa de força	50,0		50,0	50,0	50,0				
03	Bomba de esvaziamento	130,0								
03	Bomba de água industrial	40,0								
02	Bomba de incêndio	50,0								
03	Filtro de água industrial	1,0								
01	Oficina Mecânica	45,0								
02	Exaustores da sala de baterias	1,0								

Fonte: VSPA (curso interno - 2002)

Legenda: Qtde. (quantidade); P_N (potência ativa nominal disponível); $\cos \varphi$ (fator de potência da carga) e η (rendimento da carga)

Os valores de potência indicados nas “Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3” acima são valores de demanda instantânea em kW, ou seja, as “potências ativas” disponibilizadas pelas cargas.

Em cada tabela, é feita uma classificação das cargas entre cargas essenciais e não essenciais.

Esta classificação varia de projeto para projeto, dependendo dos critérios adotados e acordados pelas empresas de engenharia executiva do cliente e do consórcio fornecedor, em conformidade, no mínimo, com as normas pertinentes e exigências das instituições governamentais, reguladoras e operadoras do sistema elétrico brasileiro.

Assim, pode-se ter a uma classificação como abaixo:

- Quanto à “Tabela 3.1”, as cargas essenciais são: bomba de injeção do óleo e de drenagem da tampa da turbina, bomba secundária do regulador da turbina; cargas reativas ao transformador elevador e ao painel do regulador da turbina, além da carga referente à “escorva” do campo do gerador elétrico.
- Quanto à “Tabela 3.2”, as cargas essenciais são: conversores CA/CC, inversores CC/CA, quadro do sistema de telecomunicação, SDSC, exaustores da sala de baterias da subestação.
- Quanto à “Tabela 3.3”, as cargas essenciais são: exaustores da sala de baterias da casa de força e as bombas da central óleo-dinâmica, de drenagem e de incêndio.

Embora não apresentados em tabela, também podem ser consideradas como cargas essenciais os compressores de ar de serviço, de rebaixamento da água do tubo de sucção, compressores para estabilidade/cavitação e secador de ar comprimido de serviço.

Para se preencher os valores das colunas referentes à demanda média (em kVA), isto é, referentes à “potência aparente nominal” (S_N), deve-se efetuar cálculos preliminares, considerando os dados das cargas, onde aplicáveis, tais como:

- Fator de potência ($\cos \phi$),

- Potência ativa nominal (P_N) disponibilizada ou ativa consumida (P_C) da fonte de energia.

Desse modo, para o cálculo da potência aparente, conforme constatado na equação (2) abaixo, são necessários os valores dos rendimentos (η) e de fator de potência de cada carga (onde aplicáveis) das tabelas acima..

$$S_N = (P_N / \eta) + j \cdot (P_N / \eta) \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad \text{equação (2)}$$

Esta equação é originária da equação (1), apresentada anteriormente no item 3.4.5. (página 56), pois a potência ativa consumida (P_C) nada mais é que a razão entre a potência ativa nominal “disponibilizada” pela carga e o rendimento desta carga (onde aplicável):

$$P_C = P_N / \eta \quad \text{equação (3)}$$

Convém lembrar que a potência aparente é uma grandeza vetorial, daí a presença do indicador de número complexo “j” nas equações (1) e (2).

Através das tabelas acima (já com os valores calculados de potência aparente) e das demais cargas da usina hidrelétrica, consegue-se obter as demandas instantâneas e médias totais para cada uma das condições operativas das unidades (já vistas no item 3.2.2), ou seja:

- condição operativa 1 - todas as unidades hidrogeradoras paradas (programadas ou não (emergência ou forçada)): esta situação está representada na coluna “parada” tanto para demanda instantânea como média;
- condição operativa 2 - partida da unidade hidrogeradora (independentemente se após uma parada forçada ou parada programada): esta situação está representada na coluna “partindo”, igualmente para ambas as demandas;
- condição operativa 3: parada forçada das unidades hidrogeradoras: esta situação está representada na coluna “parando” também para as duas demandas de potência;

Então, calcula-se a demanda máxima provável (vide item 3.4.6. e “Tabela 3.4”) para cada condição operativa acima e, juntamente com os critérios dimensionais, toma-se o cenário pessimista (pior caso) como base para a determinação das potências do motor a diesel e do gerador elétrico síncrono.

3.4.6. Demanda máxima provável

O normalmente praticado é considerar como demanda máxima provável a soma das cargas permanentes com as cargas de ponta com grande probabilidade (critério também variável) de estarem operando simultaneamente com as cargas permanentes.

É exatamente este parâmetro que é usado para o dimensionamento do transformador de potência abaixador auxiliar para os serviços auxiliares elétricos.

Assim, de posse das listas de cargas elétricas e dos critérios dimensionais, elabora-se uma tabela com as potências unitárias e instaladas totais de cada carga, além das demandas instantânea, média e máxima provável (obtida com a definição acima).

O relatado aqui está ilustrado na “Tabela 3.4” a seguir:

Tabela 3.4 – Exemplo de lista de cargas para cálculo de demanda máxima - de uma Usina hidrelétrica (com turbina “Kaplan”)

Qtde.	Descrição da carga Carga por unidade	Potência aparente (kVA)		Potência demandada (em kVA)		
		Unitária	Total	Máxima	Permanente	Ponta
02	Bomba circulação de óleo do mancal guia turbina	3,0	6,0	3,0	3,0	-
02	Bomba circulação de óleo do mancal escora	60,0	120,0	60,0	60,0	-
02	Bomba de injeção de óleo do mancal escora	35,0	70,0	35,0	-	35,0
02	Bomba circulação de óleo dos mancais guia do gerador	10,0	20,0	10,0	10,0	-
01	Exaustor de vapor de óleo do mancal guia	0,5	0,5	0,5	0,5	-
01	Exaustor de vapor de óleo do mancal escora	1,5	1,5	1,5	1,5	-
02	Bomba de água da vedação	5,0	10,0	5,0	5,0	-
02	Bomba de drenagem da tampa da turbina	6,0	12,0	6,0	-	6,0
02	Bomba de óleo do regulador da turbina	170,0	340,0	340,0	170,0	170,0
01	Sistema de aquecimento do gerador	40,0	40,0	-	-	-
01	Sistema de resfriamento do transformador elevador	50,0	50,0	50,0	50,0	-
01	Excitação – escorva do campo e ventiladores	25,0	25,0	10,0	10,0	-
01	Tomada d'água – comportas de emergência	100,0	100,0	100,0	5,0	95,0
TOTAL		511,0	800,0	623,0	315,0	308,0

Fonte: VSPA (curso interno - 2002)

Legenda: Qtde. (quantidade); P_N (potência ativa nominal disponível); $\cos \varphi$ (fator de potência da carga) e η (rendimento da carga)

3.5. FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA PARA OS SERVIÇOS AUXILIARES ELÉTRICOS

Resumidamente, as fontes de energia elétrica para os serviços auxiliares podem ser classificadas em fontes primárias internas, fontes secundárias externas e fonte de emergência.

Para usinas hidrelétricas com três ou mais unidades hidrogeradoras, na maioria das vezes, as fontes primárias internas podem ser divididas em específica (ou dedicada) e em comum (ou compartilhada).

Já a fonte secundária externa, normalmente, é referente à captação externa de energia (concessionária local ou de outra usina hidrelétrica da mesma empresa).

A fonte de emergência é o grupo motor diesel-gerador que pode ser constituído por um único grupo (“grupo singelo”) ou por vários grupos em paralelo (“usina diesel”, tema desta dissertação).

Há casos em que uma pequena central hidrelétrica (PCH), decorrente de aproveitamento energético da vazão sanitária, por exemplo, representa a fonte de primária energia interna para as unidades hidrogeradoras, o que alteraria a classificação acima apresentada.

Normalmente, uma escala de prioridades de fontes é estabelecida partindo-se do uso de fonte primária interna específica até a fonte de emergência, como abaixo:

- * Fonte primária interna específica (ou dedicada);
- * Fonte primária interna comum (ou compartilhada);
- * Fonte secundária externa e
- * Fonte de emergência.

Para melhor entendimento, este conceito referente à classificação acima, será apresentado através de premissas e por meio de um exemplo de uma usina hidrelétrica com três unidades

hidrogeradoras (o qual é detalhado no capítulo 4 desta dissertação):

- Em todas as unidades hidrogeradoras será feita “sangria” através de transformadores auxiliares originando as fontes primárias internas, sendo que duas serão as fontes específicas e uma, a fonte comum;
- Cada transformador auxiliar será calculado para que, sozinho, possa alimentar os serviços auxiliares elétricos da usina hidrelétrica;
- Há previsão de fonte externa de energia elétrica (proveniente de concessionária local);
- Há previsão de fonte emergencial de energia elétrica (grupo motor diesel-gerador);
- Em condições de operação normal, havendo uma falha em uma fonte primária específica ou dedicada, será usada a fonte primária interna comum;
- Na indisponibilidade desta fonte compartilhada, a fonte específica remanescente assumirá as cargas dos serviços auxiliares elétricos.
- Na falta das fontes primárias (as específicas e a comum), a fonte externa será conectada;
- Havendo colapso total de suprimento de energia elétrica (falta das fontes específicas, da fonte comum e da externa), a última redundância de fonte de energia elétrica será acionada, ou seja, o grupo motor diesel-gerador.

A seguir, estes conceitos de fontes de energia elétrica serão mais detalhados:

3.5.1. Fontes primárias internas

3.5.1.1 Introdução

São as fontes de energia elétrica que primeiramente devem ser utilizadas para alimentação dos

serviços auxiliares elétricos, pois dispensam gastos com aquisição de energia da concessionária (fonte externa) ou com o consumo de óleo diesel (fonte de emergência).

São representadas, em geral, pelos transformadores de potência abaixadores auxiliares (TRA) (conectados nas saídas de fases dos geradores elétricos) que disponibilizam energia em baixa tensão elétrica aos painéis de distribuição geral, na maioria dos casos. Normalmente, as fontes primárias internas são classificadas em fonte específica e fonte comum.

Para uma usina composta de seis unidades hidrogeradoras, por exemplo, pode-se ter um transformador auxiliar conectado a cada unidade hidrogeradora, totalizando 06 transformadores auxiliares, onde cada transformador auxiliar fará a “sangria” de energia elétrica dos terminais de cada “gerador hidrelétrico”.

Naturalmente, a definição do número de transformadores auxiliares dependerá da configuração utilizada para a usina hidrelétrica que decorre da análise técnico-econômica, do grau de importância estratégica da usina hidrelétrica para o sistema elétrico (usina de base, por exemplo), da especificação do cliente, do grau de redundância e de flexibilidade das fontes de energia.

Outra alternativa para usina hidrelétrica de 06 unidades hidrogeradoras, como ilustração, seria uma quantidade menor de transformadores auxiliares, o que usualmente é o mais praticado. Ou seja, são concebidos três transformadores auxiliares, um para cada conjunto de duas unidades hidrogeradoras.

3.5.1.2. Fonte primária interna específica

Dessa maneira, entende-se por fontes específicas as primárias internas que alimentam exclusivamente os serviços auxiliares elétricos de uma ou mais unidades hidrogeradoras, além dos serviços gerais da casa de força, ou seja, de modo específico ou dedicado.

É comum, mesmo se tendo um transformador auxiliar para cada hidrogerador, não se usar um transformador auxiliar como fonte primária interna específica para os serviços auxiliares de cada unidade hidrogeradora. Por exemplo, no caso de uma usina hidrelétrica com três unidades geradoras, podem-se ter dois transformadores como fontes primárias específicas e o

terceiro como fonte primária comum, para o caso da falta de alguma fonte específica.

Neste caso, o transformador deverá ser projetado de modo que, sozinho, consiga fornecer energia elétrica aos serviços auxiliares elétricos das três unidades, garantindo, assim, o perfeito funcionamento dos três hidrogeradores.

O dimensionamento dos mesmos é feito com base na configuração concebida para o empreendimento e na necessidade de energia elétrica em corrente alternada que o sistema auxiliar elétrico necessita para atender às três condições operativas e nos critérios de cargas (ambos já apresentados nos itens 3.2.2 e 3.4, respectivamente, desta dissertação).

3.5.1.3. Fonte primária interna comum

Quanto à fonte de energia elétrica comum ou compartilhada, entende-se que é uma fonte primária interna (derivada de um dos geradores elétricos) que representa uma alternativa de fonte de energia elétrica para quando ocorrer falha de uma das fontes primárias dedicadas.

Assim, esta fonte comum é utilizada antes de se usar a capacidade total da fonte dedicada remanescente e, conseqüentemente, antes de se usar energia externa (que deve ser adquirida) e antes de se consumir óleo diesel, via acionamento dos grupos motor diesel-gerador.

Em geral, esta fonte primária comum permanece como uma “reserva quente”, ou seja, até os terminais de seus respectivos disjuntores de entrada dos painéis de distribuição geral, todos os equipamentos, necessários para fornecimento de energia às barras destes painéis, estarão aptos e energizados.

Para um perfeito funcionamento e não ocorrência de paralelismo de fontes ressalta-se que os disjuntores de entrada correspondentes à fonte comum estarão abertos e que é projetado um sistema de intertravamento elétrico parcial (referente ao gerador G1) dos disjuntores e de lógica de transferência de fontes.

A “Figura 15” ilustra a configuração acima citada (a menos das fontes externas, que também “alimentam” as barras dos painéis de distribuição geral) e indica a fonte de emergência (vide item 3.5.3.). Notar que o ponto de conexão (indicado por *) de linhas geométricas contínuas

(que representam barras ou interligações elétricas) não são pontos de conexão elétrica.

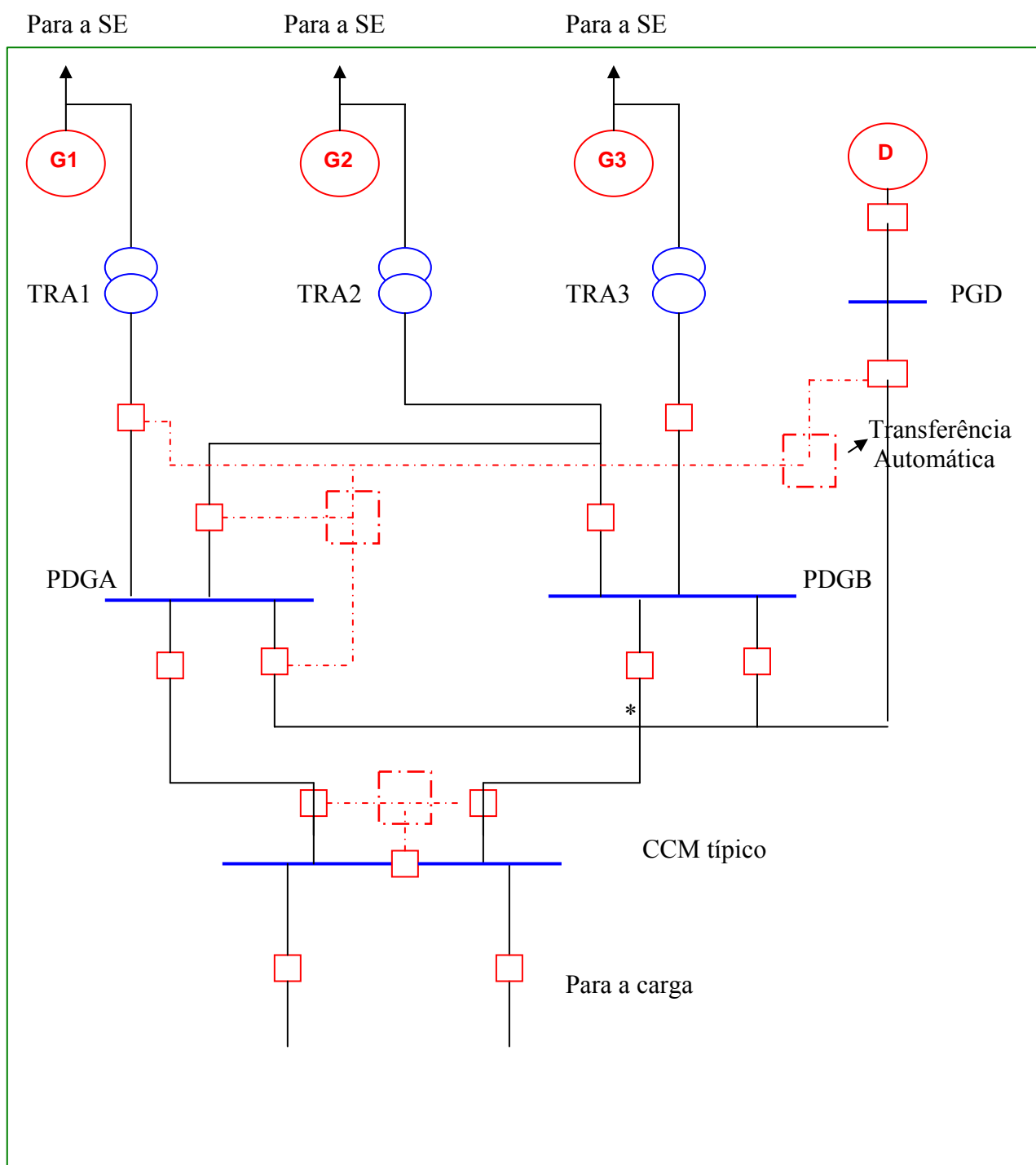


Figura 15-Desenho unifilar geral de uma usina hidrelétrica
Fonte: VSPA (2004)

Nesta figura, o transformador auxiliar referente ao gerador hidrelétrico G2 representa a fonte interna primária comum e o gerador D indica o grupo motor diesel-gerador de emergência.

Também estão indicados os transformadores de potência abaixadores auxiliares; as barras dos painéis de distribuição geral dos lados A e B (PDGA e PDGB), a barra do painel do grupo diesel (PGD) e as barras de um centro de comando de motores típico (CCM), como ilustração.

Os quadrados contínuos representam os disjuntores e as linhas tracejadas, o intertravamento entre os disjuntores das fontes, de transferência e de acoplamento (indicado na barra do CCM).

Para o caso de “usina diesel”, a representação é análoga, tendo, neste caso, um disjuntor de entrada ao painel do grupo diesel (PGD) para cada grupo motor diesel-gerador, devidamente intertravados para se evitar, também, o paralelismo de fontes na barra deste painel.

3.5.2. Fonte secundária externa

São as fontes decorrentes de alimentação externa, em geral, adquiridas de concessionária de energia local em média tensão. Portanto, necessitam de cubículos de média tensão para manobra, proteção e medição que são denominados de painéis de alimentação externa, já comentados no item 3.2.3.1.4. desta dissertação.

Na saída dos painéis de alimentação externa são instalados transformadores de potência abaixadores auxiliares que, após transformarem a média tensão de entrada para baixa tensão elétrica alternada, transferem a energia, já em baixa tensão, aos painéis que devem ser supridos por estas fontes de energia externa. Dependendo das distâncias envolvidas (o que inviabiliza a distribuição em baixa tensão), esta solução pode ser aplicada ao vertedouro, à tomada d’água e à subestação. Desse modo, nesta configuração, esta fonte de energia será considerada como fonte primária de energia.

3.5.3. Fonte de emergência

A fonte de energia elétrica de emergência é representada pelo grupo motor diesel-gerador, quer seja na configuração “grupo singelo” ou “usina diesel”. Tais grupos diesel podem ser instalados na casa de força, na subestação e no vertedouro.

Naturalmente, os locais de instalação, quantidades e configuração de grupos diesel bem como

sua capacidade dependem dos critérios para dimensionamento de grupos diesel, da potência elétrica requerida pelos serviços auxiliares elétricos e das distâncias envolvidas (critérios para cablagem e queda de tensão).

Assim, no caso de falta total de suprimento de energia aos serviços auxiliares elétricos da usina hidrelétrica, os grupos motor diesel-gerador devem garantir as “alimentações” das cargas essenciais e imprescindíveis para atender as diversas condições operativas das unidades hidrogeradoras.

Estas condições operativas (unidades paradas, partida de unidade ou parada forçadas das mesmas) já foram explanadas no item 3.2.2 desta dissertação.

No item 3.6. seguinte, será feito um detalhamento maior do grupo motor diesel-gerador, cuja vista geral está na “Figura 16” abaixo:



Figura 16-Vista geral de um grupo motor diesel-gerador de 500 kVA máximos
Fonte: Cummins

3.6. GRUPO MOTOR DIESEL-GERADOR PARA USINA HIDRELÉTRICA

3.6.1. Introdução

Basicamente, o grupo motor diesel-gerador, para usina hidrelétrica é composto de um motor diesel de combustão interna e injeção direta (classificado como motor de “ciclo diesel”) acoplado a uma máquina elétrica síncrona (gerador elétrico de corrente alternada, também denominado de “alternador”, associado a um sistema de excitação).

O sistema de excitação pode ser concebido com excitação do tipo:

- Estática: os enrolamentos polares (campo) do alternador são excitados diretamente pelo sistema de excitação estática (em tensão contínua da saída de ponte de tiristores) a partir da tensão de saída dos alternadores, ou seja, depende da tensão disponibilizada à carga.

Para tal, não exige excitatriz, mas necessita de anel coletor, escovas e, em geral, de excitação inicial (“field flashing” ou “escorva” do campo). Como vantagem, possuir menor tempo de regulação e forma de onda mais deformada. Assim, é recomendável para partida de motores de indução maiores e é inadequado para equipamentos que necessitam de forma de onda menos distorcida.

- Brushless, ponte rotativa ou excitação auto-excitado: é o tipo mais barato e mais usado. O campo do alternador é excitado diretamente pela ponte rotativa de retificadores (também em tensão contínua).

A ponte rotativa é alimentada pela tensão alternada induzida no rotor da excitatriz a partir da tensão contínua aplicada pelo regulador digital (por tiristores) nos enrolamentos do estator da excitatriz.

O regulador de tensão também é alimentado pela tensão de saída dos alternadores. Portanto, não necessita de anel coletor e nem de escovas, mas também exige de excitatriz e, em geral, de “escorva” do campo.

Como vantagem, na presença de um curto-circuito simétrico na saída do alternador o campo do mesmo deixa de ser excitado (não se “sustenta”). Mas, por conseguinte, deve-se atentar com o tempo hábil para desarmar os disjuntores de proteção.

- Excitação tipo independente ou por PMG (permanent magnet generator): além da excitatriz anteriormente citada, há uma excitatriz auxiliar composta de um “ímã permanente rotativo” que induzirá uma tensão alternada no estator da mesma, a qual será aplicada no regulador de tensão digital e deste ao estator da excitatriz principal (contínua).

A partir deste ponto, este sistema de excitação é análogo ao sistema anterior, exceto que, neste caso, não há necessidade de field flashing do campo. Este tipo é chamado de excitação independente porque não utiliza a mesma energia disponibilizada às cargas para alimentar o campo do alternador.

Este fato representa sua grande vantagem, pois podem suportar valores altos de correntes (até três vezes a nominal) por tempos consideráveis (cerca de até 10s) o que o torna recomendável para partida de grandes motores elétricos, para alimentação de cargas não lineares como, por exemplo, UPS (uninterruptible power supply ou “no breaks”).

Também, há boa performance ante o curto-circuito prolongado (neste caso, usar transformadores de corrente e disjuntor de saída de fases do GMG).

Dessa forma, com a operação do motor diesel, a potência ativa no eixo do mesmo é transmitida ao gerador síncrono devido ao acoplamento (que em geral é do tipo disco flexível ou single bearing). Consequentemente, o gerador elétrico ou alternador, quando convenientemente excitado, disponibiliza uma tensão elétrica alternada nos seus terminais de fases.

Ao se ter um circuito elétrico fechado (“fechamento” do disjuntor de uma carga), haverá a circulação de corrente elétrica, caracterizando, assim a conversão de energia química do óleo diesel em energia elétrica.

Como a função do grupo motor diesel-gerador é gerar energia elétrica através do acionamento do motor diesel, o mesmo representa uma fonte alternativa de energia aos serviços auxiliares

elétricos, no caso, para alimentação das cargas essenciais da usina hidrelétrica.

Estes grupos podem ser acionados e comandados tanto localmente como remotamente e de forma manual ou local, mediante chaves seletoras, quadro local e painéis de comando.

3.6.2. Classificação de potências

Convém ressaltar que, quanto ao valor de potência, tolerância permitida e regime de trabalho, os grupos motor diesel-gerador possuem classificações que variam conforme os fabricantes que, em geral, adotam as normas de origem de seus respectivos países. Ressalta-se também, que no Brasil há uma normatização específica (norma ABNT NBR6396 - “Motores alternativos de combustão interna não veiculares” – 1976).

Assim, para os fabricantes instalados no Brasil, tem-se:

- Grupo de fabricantes, originários da Europa, seguem, em geral, as normas DIN (DIN 6270 e DIN 6271);
- Grupo de fabricantes, originários dos Estados Unidos da América, seguem, em geral, as normas ISO (ISO 8528 e 3046);

Assim, com base nas Normas ISO 3046, ISO 8528, DIN 6271, ABNT MB 749 (NBR 06396), e ABNT MB 130 (NBR 05477), têm-se as seguintes classificações usualmente praticadas para os grupos motor diesel-gerador envolvendo valores de potência, tempo de funcionamento e potência reserva possível:

- Stand-by ou Emergência (intermitente ou máxima): representa o maior valor de potência da faixa de valores da “Tabela 3.5” seguinte e é aplicável para fornecimento de emergência.

Neste caso, o grupo motor diesel-gerador é capaz de suprir energia em aplicação do tipo “cargas variáveis” por um período recomendável, em geral, de 300h/a, entretanto, sem capacidade de sobrecarga.

Esta classificação é usada para suprir energia durante a interrupção da energia normal e confiável, porém, não deve ser “paralelada” com a rede normal de energia. Os tempos de operação e valores de potência correspondentes (fator de carga (FC)) variam conforme recomendações dos fabricantes.

Há fabricante que recomenda esta classe de potência para somente atender aplicações do tipo “cargas variáveis” com fator de carga média de 80% de sua classificação “stand-by” durante um tempo máximo de 200 horas de operação por ano. Já para o caso de 100% de sua classificação “stand-by” o tempo máximo será de 25 horas por ano. Também indica que, com esta classificação, não é permitido paralelismo com fonte normal de energia. A “Figura 17” abaixo representa esta recomendação.

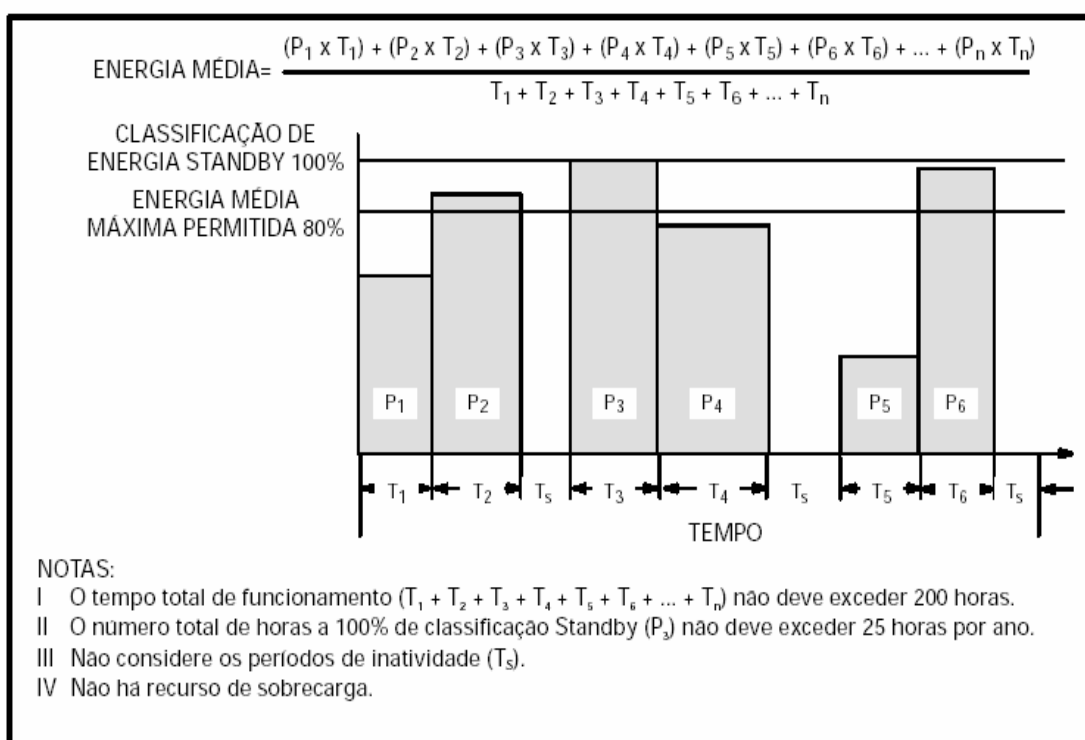


Figura 17-Visão gráfica da classificação “stand-by”
Fonte: Cummins

- Contínuo (ou prime power): representa o valor intermediário e recomendado para aplicações do tipo “cargas variáveis” por um período, em geral, de 1.000h/a, em regime de emergência. Neste caso, há uma capacidade de sobrecarga de 10%, desde que operando uma hora a cada doze horas.

Esta classificação é usada para suprir energia durante a interrupção da energia adquirida comercialmente, porém, pode ser “paralelada” com a rede comercial de energia (sujeito a limitação de tempo de operação e exigências da concessionária) e pode suprir energia em aplicação do tipo “carga constante”, desde que seguindo recomendações dos fabricantes para tal.. Os tempos de operação e potência (fator de carga (FC)) também variam conforme recomendações dos fabricantes.

Igualmente à classificação “stand-by”, também há fabricante que recomenda esta classe de potência, para aplicações do tipo “cargas variáveis”, com fator de carga média de 70% de sua classificação “contínuo ou prime power”, considerando um tempo máximo de 500 horas de operação por ano. Quanto à capacidade de sobrecarga de 10% do valor da potência “contínua”, a mesma não deverá exceder o tempo máximo de 25 horas por ano (operando no regime de uma hora a cada doze horas).

A “Figura 18” abaixo representa esta recomendação.

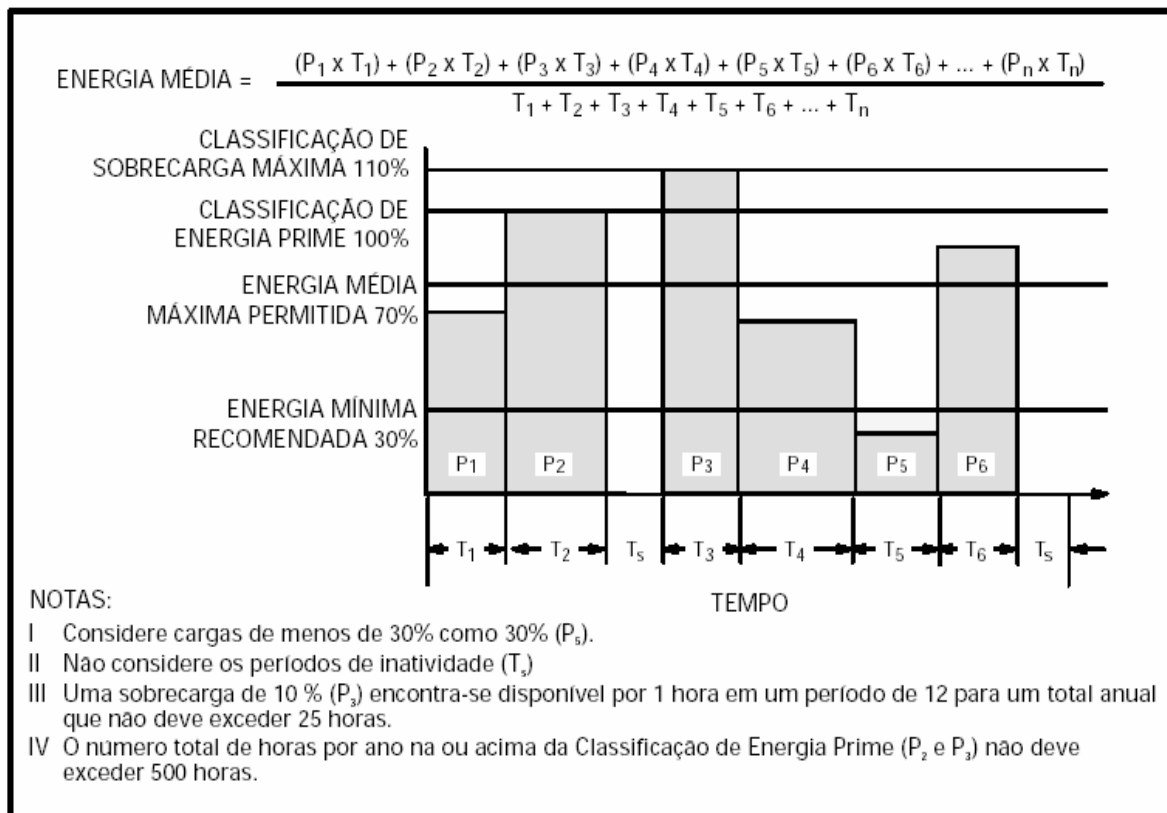


Figura 18-Visão gráfica da classificação “contínuo ou prime power”

Fonte: Cummins

- Básica (base power): Representa o menor valor de potência (em torno de 70% da potência stand-by), porém com o maior tempo de uso recomendado, 8.400 h/a, restando cerca de 4% ao ano para manutenção, ou seja, para praticamente uso contínuo de energia para uma carga de até 100% da classificação “básica ou base power”. É recomendado para aplicações do tipo “cargas constantes” e não possui uma capacidade de sobrecarga.

Esta classificação é usada para suprir energia durante a interrupção da energia adquirida comercialmente, recomendada para “paralelismo” com a rede comercial de energia (observar as exigências da concessionária), porém, por prolongados período de tempo, ou seja, quase sem limitação de tempo de operação.

A “Figura 19” abaixo representa esta recomendação.

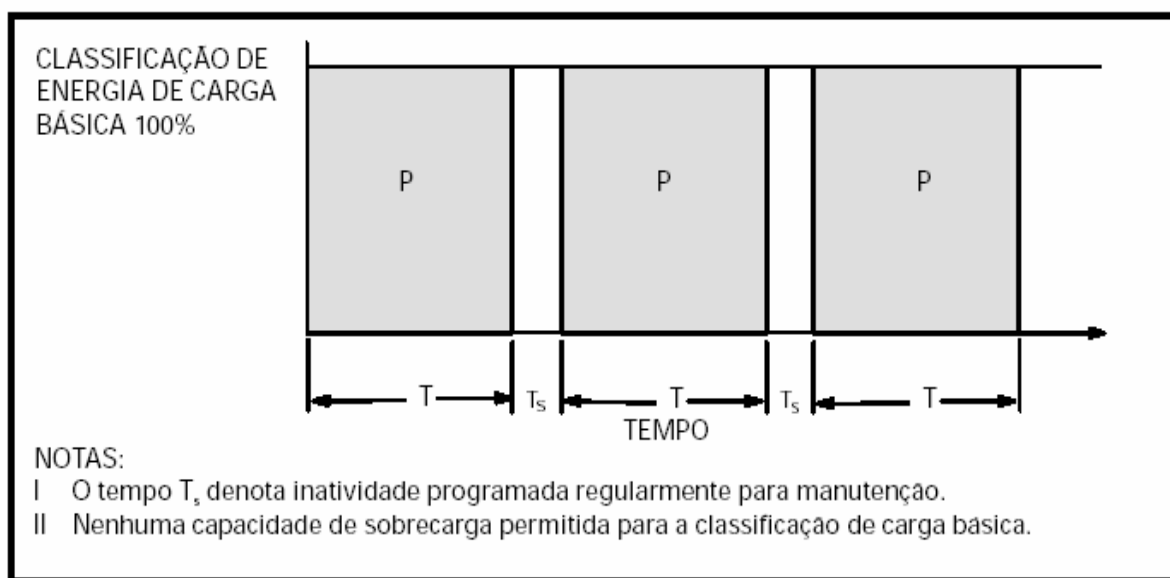


Figura 19-Visão gráfica da classificação “básica ou base power”
Fonte: Cummins

Comercialmente, a nomenclatura acima apresentada é alterada conforme os diversos fabricantes: de stand-by para intermitente ou limited time power (LTP), de contínuo para prime power (PRP) e de básica para prime ou base power.

Também variam, conforme os fabricantes, os tempos de operação e os valores de potências (fator de carga (FC)) correspondentes.

Destaca-se que no Brasil, são fabricados grupos motor diesel-gerador singelos de até 450 kVA (contínuo) ou 500 kVA (stand-by ou intermitente), devido a não fabricação de motores acima 360kW (contínuo) no mercado nacional, fato que não ocorre com a fabricação de geradores elétricos.

Como as usinas hidrelétricas são concebidas para alimentarem cargas variáveis (de diversas modalidades, desde baterias, inversores, fontes, cargas motrizes e resistivas, etc) a classificação mais recomendada de faixa de potência é a classificação “Contínua (ou prime power)”.

A “Tabela 3.5” ilustra uma vasta faixa de potências e arranjos de modelos de motor diesel e gerador elétrico.

Tabela 3.5 - Dados gerais de grupos motor diesel-gerador (fabricantes variados)

Potências (kVA-kW)			dimensões (mm)			massa (kg)
Stand-by	Contínua	básica	comprimento	largura	altura	
13 - 10,4	11,7 - 9,4	10,5 - 8,4	1090	725	970	420
110 - 88	100 - 80	99 - 79	2050	800	1300	940
170 - 136	150 - 120	123 - 99	2580	960	1400	1280
290 - 232	260 - 208	203 - 162	2900	1030	1850	1880
310 - 248	280 - 224	253 - 203	3260	1000	1800	2820
380 - 304	345 - 276	266 - 213	2900	1150	1930	2350
450 - 360	405 - 324	315 - 252	2900	1150	1930	2350
500 - 400	455 - 364	319 - 255	3180	1120	1587	2750
625 - 500	556 - 445	500 - 400	2800	1400	1700	2880
750 - 600	676 - 541	600 - 480	3500	1400	1800	3540
1000 - 800	900 - 720	706 - 565	4361	1743	2328	7973
2500 - 2000	2275 - 1820	319 - 255	5950	2192	3265	17190

Fonte: Catálogo STEMAC nº 050.011.0034 Rev. 01 – Abril/2005

A “Tabela 3.5” acima engloba diversos fabricantes de motores. Porém, para qualquer caso, até a potência stand-by de 500kVA, os motores dos grupos são de dois a seis cilindros e, acima dessa potência, de seis a dezesseis cilindros.

3.6.3. Composição geral de um grupo motor diesel-gerador

O grupo motor diesel-gerador é composto por uma série de componentes desde o sistema de partida ao sistema de escape de gases. A seguir, serão listados alguns itens para maior visualização:

- Sistema de partida dos motores:

Este sistema pode ser concebido do tipo “partida elétrica” “partida por ar comprimido” ou “por mola”. O mais usado para grupo motor diesel-gerador, aplicável para usina hidrelétrica, é o sistema de “partida elétrica”, o qual é composto basicamente de baterias (que podem ser de 12V (para grupos diesel menores) ou 24V (para grupos diesel maiores) e motor de arranque.

- Sistema de admissão de ar:

Em geral, o ar de combustão é aspirado na sala do grupo diesel. Assim, a limpeza deste ar aspirado é feita por filtros adequados ao grau de impurezas do ar da sala do grupo diesel.

- Sistema de combustível e de lubrificação:

Composto por dispositivos que irão permitir a admissão e injeção do óleo diesel ao motor diesel e a lubrificação do motor. Para tal, são necessários, entre outros, de bomba injetora, bicos injetores, tanque de óleo, bomba de circulação forçada do óleo lubrificante, regulador de pressão e filtros.

A injeção pode ser de forma indireta (atualmente, pouco utilizada) e de forma direta

(representa o tipo de injeção mais usado, onde o combustível é injetado diretamente sobre cabeça do pistão através de bicos injetores).

- Sistema arrefecimento (refrigeração) à água:

Normalmente o motor é resfriado à água e com a circulação da mesma no bloco e nos cabeçotes de modo forçado, em circuito fechado e pressurizado através de uma bomba centrífuga. Para tal, são usados válvulas termostáticas, radiador (montado junto ao motor) e ventilador que, similarmente à bomba centrífuga, é acionado pelo próprio motor. No caso de locais frios, usa-se também um líquido anticongelante misturado à água.

- Sistema de pré-aquecimento da água de arrefecimento e do óleo lubrificante:

Considerando que o sistema de energia de emergência deve estar apto a suprir as cargas prioritárias (essenciais) no menor tempo possível um ponto crítico é o tempo decorrido desde a detecção da falta de energia normal até a transferência de carga. Isto é, passando pelas etapas de transferência de fontes de energia, de partida do grupo motor diesel-gerador ou da “usina diesel” até a efetiva “alimentação” das cargas.

Desse modo, quanto maior for a exigência ao grupo diesel estar apto a “assumir” cargas (maiores valores de carga em menores tempo) maiores são os cuidados com a partida a frio. Tais valores poderão chegar até a 100% da carga num único passo de aceitação de carga (cerca de 10 s após a partida do grupo diesel). Em geral, adota-se, para a usina hidrelétrica, o conceito de o grupo estar apto a “assumir” 50% da carga prescrita em até 10 s após o comando elétrico de partida do “grupo singelo” ou da “usina diesel”.

Daí a necessidade de um sistema que possibilite um pré-aquecimento da água de arrefecimento e do óleo combustível. Este sistema é constituído por resistores elétricos, é acionado quando o grupo diesel está fora de operação e também deve considerar as temperaturas ambientes e as normas aplicáveis.

- Sistema de exaustão de gases (escapamento e silencioso):

O dimensionamento deste sistema é impactado pelo nível de ruído solicitado e pelo movimento relativo entre o escapamento e o grupo diesel. Em geral, o nível de ruído solicitado é de até 95 dB, medido, e em qualquer direção, a 5 m de distância da ponta do tubo de saída do escapamento, sendo o grupo diesel fornecido sem carenagem.

Assim, este sistema é constituído de coletor de descarga arrefecido, de silencioso com alto grau de abafamento e demais acessórios para isolamento de vibrações e de calor.

A “Figura 20” mostra a sala de alojamento de uma “usina diesel” instalada em usina hidrelétrica. Nesta figura pode-se observar o motor a diesel (posição 2), o gerador elétrico síncrono (3) e o sistema de escapamento (1).

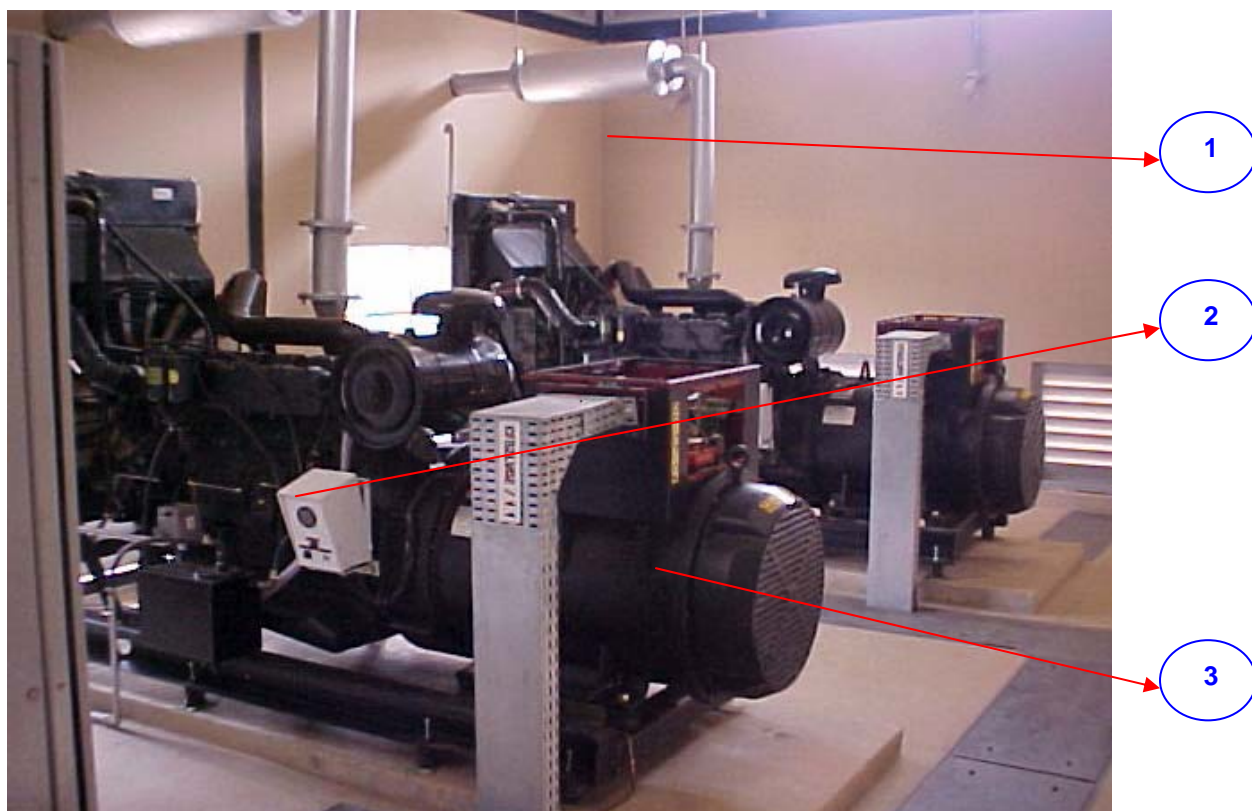


Figura 20-Foto de uma “usina diesel” em usina hidrelétrica
Fonte: Stemac (2005)

- Sensores e equipamentos para controle, comando, proteção e regulação:

É composto por vários dispositivos como relés e sensores instalados no grupo motor diesel-gerador e nos painéis do grupo diesel e de sincronismo, além de monitoramento de

grandezas elétricas (tensão, frequência, corrente, potência, energia, etc).

Assim, há fabricantes que disponibilizam sistema de proteção contra curto-circuito com monitoramento de corrente nas três fases de saída do alternador (através de transformadores de corrente e disjuntor de saída incorporados) e permitem proteções contra voltagem excessiva e baixa, contra perda do campo e da energia reversa, contra sobrecorrente trifásica e sobrecorrente de terra.

Também há os reguladores de tensão e de velocidade associados ao grupo que são responsáveis pelo controle (regulação) de velocidade do motor diesel e pela regulação da tensão elétrica do gerador elétrico síncrono.

Com isso, estes reguladores são imprescindíveis para o tempo de resposta do grupo frente a uma alteração de carga (acréscimo ou redução).

Ou seja, mediante oscilações decorrentes de grandes e bruscos carregamentos ou rejeição de carga, os reguladores de tensão e de velocidade (governor) procurarão regular a variação da tensão do alternador elétrico e a variação da rotação do motor (frequência).

Para tal, os reguladores atuarão nos ângulos de disparo dos tiristores e no sistema de injeção de combustível e este tempo de resposta varia de acordo com os diversos componentes do processo (alternador, motor, combustível, reguladores e magnitude das oscilações (que está relacionada com a natureza das cargas manobradas)).

Na concepção de “grupo singelo”, caso a faixa de variação de tensão e de frequência, mesmo com atuação dos reguladores, permanecerem fora da faixa projetada o sistema de proteção comandará o indesejável desligamento da fonte de emergência.

Entretanto, a ausência total de energia emergencial torna-se muito mais improvável no caso de se ter uma “usina diesel” com 02 ou mais unidades singelas. Isto porque o sistema de proteção irá desligar a unidade singela que não está respondendo às atuações dos reguladores, permanecendo as demais íntegras e fornecendo uma energia parcial. Tal possibilidade reforça a vantagem de flexibilidade e de disponibilidade da “usina diesel”.

Ainda há outros dispositivos e componentes como para amortecimento de vibrações e para aplicação em regiões sujeitas aos abalos sísmicos, sistema de manutenção do óleo de lubrificação, sistema de aquecimento da bateria, skid (base de instalação) etc.

3.6.4. “Usina diesel”

Representa um conjunto de grupos motor diesel-gerador singelos, de potência menor, operando em paralelo, ou seja, com uma potência total equivalente a um único grupo motor diesel-gerador de maior potência, que acima de 500 kVA (stand-by), não é fabricado no Brasil.

Desse modo, para se atender as necessidades de potências maiores, ou se importa o motor, com posterior acoplamento ao gerador nacional e montagem do grupo motor diesel-gerador, ou se concebe a execução de vários grupos motor diesel-gerador singelos menores para operarem em paralelo, constituindo, assim, a usina diesel de potência equivalente ao único grupo diesel maior.

Para o caso de importação, naturalmente, deve ser levado em conta a variação cambial e os custos de importação e de assistência técnica.

Desse modo, com base na “Tabela 3.5”, considerando-se a necessidade de uma potência contínua (prime) de 2.275 kVA pode-se usar 6 grupos motor diesel-gerador de 405 kVA ou usar 02 grupos singelos de 345 kVA, para uma potência de 676 kVA.

Assim, a decisão da configuração a ser adotada deverá ser resultante de uma análise técnico-econômica que considerará os seguintes itens:

- Disponibilidade e custo de espaço para instalação (há necessidade de se ter cerca de 1m entre as máquinas singelas);
- Taxas cambiais, custos de importação (taxas, impostos) e de operação;
- Flexibilidade, confiabilidade e disponibilidade;

- Operação paralelada e divisão de cargas;
- Intercambialidade de peças sobressalentes e pós-venda (assistência técnica), etc.

Entretanto, convém destacar que as empresas que executam montagem de grupos motor diesel-gerador no Brasil, atualmente, são beneficiadas com a redução de impostos de importação, fato que não ocorre com as empresas que fabricam motores diesel no Brasil (mesmo que também executem montagem de grupo motor diesel-gerador).

De um modo geral, os diversos arranjos de grupos motor diesel-gerador possuem soluções semelhantes, tanto no tocante aos motores diesel e aos geradores elétricos como também aos painéis de comando e controle, às sinalizações, proteções e monitoramento, manutenção e assistência técnica, diferenciando entre si quanto à faixa de potência total de “usina diesel”.

Logo, de um modo geral, qualidade, confiabilidade, desempenho, vida útil superior a vinte anos e nível de ruído não representam diferenciais significativos entre os diversos fabricantes. Destaca-se, contudo, que há pequenas diferenças no tocante às soluções para aceitação de carga e paralelismo de grupos diesel da “usina diesel”.

Assim, há “grupos singelos” ou agrupados em “usina diesel” instalados nos mais diversos segmentos brasileiros, desde industriais, supermercados, condomínios residenciais ou comerciais, setores hoteleiro e hospitalar, centrais telefônicas, empresas de transporte (metrô), áreas bancária e agrícola, etc.

Em tais segmentos, a energia confiável gerada via grupo motor diesel-gerador é usada como fonte principal de energia, complemento em horários de ponta, cogeração do excedente ou como fonte de emergência e até mesmo como usina de geração de energia a diesel, inclusive acima de 50 MW, para atender emergencialmente a escassez de energia elétrica no Brasil (durante o “apagão” de 2001). Algumas dessas usinas foram, posteriormente, desmontadas e exportadas. (como exemplo, a “UTE Sete Lagoas” - MG, empreendimento de 68,8 MW do grupo Cummins).

Como ilustração dessa variedade de setores, a “Tabela 3.6” indica resumo parcial e preliminar de “usinas diesel” instaladas no Brasil até 02/2006 como geração.

Tabela 3.6 - Resumo parcial e preliminar de “usina diesel” no Brasil até 02/2006 - geração

Segmentos de atividade	potência instalada (em kW)	número de empreendimentos	número de unidades
Alimentos e bebidas	27.233	21	46
Extrativa mineral	11.010	2	5
Papel e celulose	2.240	2	3
Química e Petroquímica	6.874	5	10
Siderurgia e metalurgia	6.768	6	11
Têxtil	2.000	1	2
Outras indústrias	54.286	24	60
Comércio e serviços	30.631	15	33
Hospitais e hotéis	8.616	8	17
Shopping e edifícios corporativos	1.673	2	3
Total	151.331	86	190

Fonte: COGEN SP - Fevereiro/2006

Similarmente, a “Tabela 3.7” indica um resumo parcial de “usinas diesel” instaladas no Brasil, até 02/2006 como cogeração.

Tabela 3.7 - Resumo parcial e preliminar de “usina diesel” no Brasil até 02/2006 - cogeração

Segmentos de atividade	potência instalada (em kW)	número de empreendimentos	número de unidades
Borracha	972	1	3
Hotéis	264	1	1
Química e petroquímica	1.000	1	1
Total	2.236	3	5

Fonte: COGEN SP - Fevereiro/2006

Cabe ressaltar que as “Tabelas 3.6 e 3.7”, por representarem resumos parciais e preliminares de “usinas diesel” instaladas no Brasil, servem como uma referência e mostram uma potência instalada de mais de 153 MW.

Abaixo, a “Figura 21” ilustra 04 grupos singelos que irão compor uma “usina diesel”:

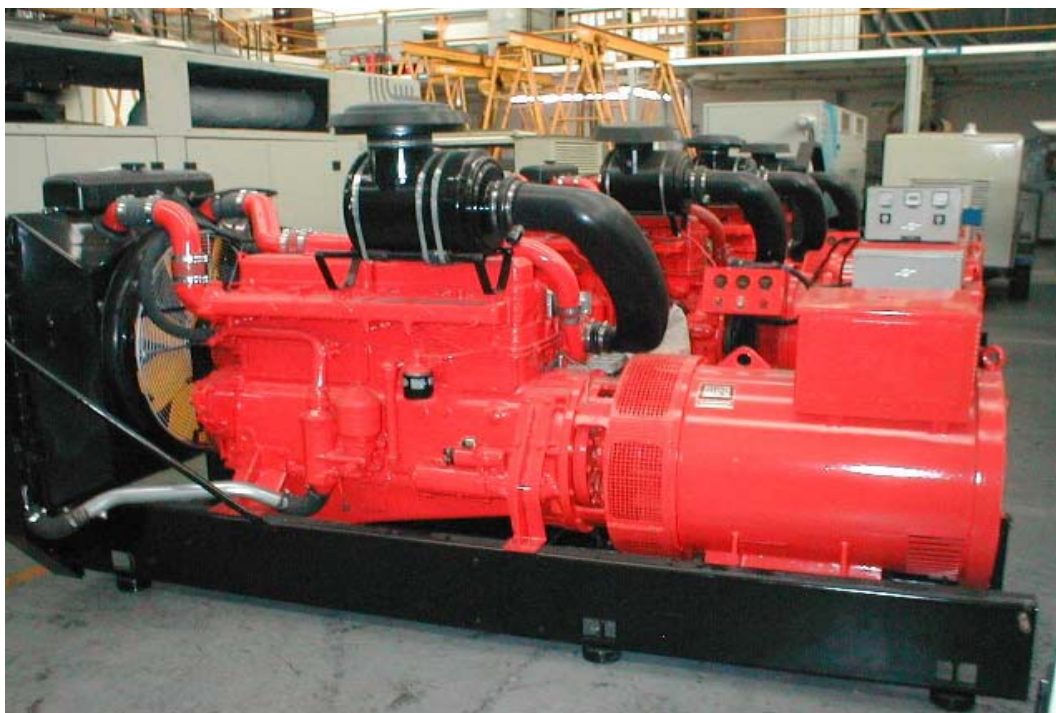


Figura 21-Visão geral de uma “usina diesel”
Fonte: Maquigeral

Registra-se que um dos fornecedores instalado no Brasil, já comercializou mais de 45.000 grupos motor diesel-gerador em mais de 50 anos de Brasil, vendidos nas configurações “grupo singelo” ou em “usina diesel”.

Para se ter uma idéia de que a concepção de “usina diesel” já é um conceito consolidado, podem-se citar usinas diesel operativas em São Paulo (em rede de televisão, laboratórios, jornais, hospitais, etc) tais como: 3X1563 kVA, 2X1563 kVA, 4X625 kVA, 3X1941 kVA, 2X1941 kVA, 5X450 kVA, 3X2500 kVA, 3X950 kVA. Em outros estados brasileiros, tem-se: 2X360 kVA, 2X2.000 kVA, usinas de 1.000 e 3.600 kVA.

Quanto ao índice de falhas de grupos motor diesel-gerador em paralelo, não foi possível, até o presente momento, a obtenção de uma estatística de falhas de “usina diesel” no Brasil, provavelmente por falta de registros destas inúmeras “usinas diesel” na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

A portaria nº 303 de 18/11/2004 do Ministério das Minas e Energia (MME) do Brasil indica os conceitos das taxas que influenciam no cálculo da potência assegurada (PA) da usina (taxa equivalente de indisponibilidade forçada (TEIF) e a taxa de redução de disponibilidade por manutenção programada (IP)) para usina térmica (UTE) sem, todavia, para as UD's.

O que se pretende mostrar nesta dissertação é que, em usinas hidrelétricas que necessitam de energia auxiliar acima de 500 kVA intermitente (ou stand-by, ou máximos), pode-se instalar “usina diesel” equivalente sem prejudicar os critérios de confiabilidade e operacionabilidade além do quesito econômico.

A “Tabela 3.8”, compilada de outras tabelas disponíveis no site da ANEEL, indica as potências totais de usinas hidrelétricas brasileiras em operação, outorgadas em construção e outorgadas não iniciadas. Nesta tabela também são indicados os totais referente às diversas modalidades outorgadas e a potência total da matriz elétrica brasileira (caso da coluna referente à usina hidrelétrica em operação, incluindo as potências importadas).

Tabela 3.8 - Potências totais de UHE's em operação e outorgadas no Brasil - 2006

	UHE's operativas (em kW)	UHE's outorgadas (kW) em construção	UHE's outorgadas (kW) não iniciadas
UHE	71.390.105	2.771.168	5.109.600
Total	101.731.582 (*)	4.176.976	23.594.903
Participação	70,17%	66.34%	21,66%

Fonte: ANEEL – site/fevereiro/2006

(*) representa o total da matriz energética, incluindo a energia importada.

Com base na “Tabela 3.8” acima, há quase 8 GW referentes às usinas hidrelétricas em construção ou por iniciar. Naturalmente, as potências são variadas e incluem os grandes aproveitamentos.

Apesar da maioria das usinas hidrelétricas que estão em construção já terem adquirido a fonte de emergência para os serviços auxiliares elétricos, tem-se um potencial de mais de 5 GW para implementação de “usinas diesel” (onde aplicável) e, com isso, promover um incremento no mercado nacional de fabricantes de componentes de grupos motor diesel-gerador.

3.6.5. Condições de dimensionamento

Para o dimensionamento da potência total do grupo motor diesel-gerador, algumas premissas devem ser levadas em consideração, tanto para o cálculo da potência mecânica (kW) do motor diesel, como para o cálculo da potência elétrica (kVA) do gerador síncrono.

Assim, de um modo geral, têm-se as seguintes premissas e ações a serem consideradas:

- Premissa de dimensionamento 1: elaborar ou conhecer a lista de cargas completa da usina hidrelétrica, ou seja, as cargas da casa de força (atenção especial às cargas da unidade, no caso bomba de regulação para turbinas Kaplan), as cargas da subestação, da tomada d'água e do vertedouro.

Esta lista deve conter as quantidades de cargas (incluindo as de reserva), condições ambientais (altitude e temperatura) e as características técnicas das cargas (tensão de alimentação; correntes de nominal e de partida, rendimento e fator de potência);

- Premissa de dimensionamento 2: estabelecer ou conhecer a configuração (tensão de alimentação e tipo de alimentação) e o modo operativo das cargas e da usina, no tocante aos serviços auxiliares elétricos e fontes de energia para os mesmos.

Conhecer as condições operativas das unidades hidrogeradoras (já explanadas no item 3.2.2 desta dissertação) para se certificar da não possibilidade de paralelismo de fontes;

- Premissa de dimensionamento 3: estabelecer ou conhecer os critérios de definição de cargas essenciais, permanentes e de ponta (identificação das cargas e dos tempos adotados), além do critério definido para demanda média, ou seja, que cargas o grupo motor diesel-gerador deve assumir na ausência de energia;
- Premissa de dimensionamento 4: estabelecer critérios de temporização para todos os motores (faixa de tempo e de potência dos motores) para se evitar partida simultânea dos mesmos. É imprescindível a partida escalonada dos motores para se diminuir a potência do grupo diesel da usina hidrelétrica;
- Premissa de dimensionamento 5: ter claramente o critério e a operação do sistema de alívio de cargas a ser concebido para o empreendimento;
- Premissa de dimensionamento 6: estabelecer ou conhecer os critérios de tempo para cada uma das condições operativas das unidades (máquina parando e máquina partindo). Em geral são usados 5 e 10 min, respectivamente;
- Premissa de dimensionamento 7: estabelecer o critério para carga inicial que o motor diesel já está suportando, quando for assumir a partida da maior carga (bomba de regulação para turbina Kaplan, por exemplo). Neste ponto indicar também o critério de variação de frequência;
- Premissa de dimensionamento 8: de posse dos dados acima e com base nas equações (1), (2) e (3) apresentadas no item 3.4.5. (páginas 56 e 64), obter a potência total instalada, as demandas instantâneas (potência ativa em KW, para cálculo da potência do motor diesel) e demanda média (potência aparente em kVA, para dimensionamento do gerador síncrono elétrico) para cada condição operativa das unidades (vide “tabelas 3.1 a 3.4”).

Nesta fase, já se deve ter a identificação das cargas essenciais;

- Premissa de dimensionamento 9: com base nos dados acima, estabelecer ou conhecer os critérios da pior condição ou situação mais adversa a que o motor diesel será submetido e verificar se o mesmo suporta esta condição de demanda instantânea.

Esta premissa varia conforme o arranjo concebido para a usina hidrelétrica, podendo ser, por exemplo: com o motor diesel já alimentando uma carga inicial, considerar a partida de uma unidade geradora simultaneamente à partida da maior carga (que pode ser a moto-bomba de regulação, no caso de turbinas Kaplan); ou durante a parada forçada de todas as unidades, além da carga inicial, ocorrer a partida de outra carga de valor significativo, possível para esta situação (bomba de drenagem, por exemplo);

- Premissa de dimensionamento 10: com o valor do rendimento do gerador elétrico, determinar a potência do motor diesel, que, após o cálculo do gerador elétrico, deverá ser revista buscando-se a padronização e compatibilização com os produtos do mercado nacional (para o caso de grupo singelo) ou de análise para definição da melhor configuração para usina diesel.
- Premissa de dimensionamento 11: em decorrência da premissa de pior condição ao motor diesel, tem-se a condição mais desfavorável para o gerador elétrico e, nesta condição, o mesmo deverá ter potência em regime contínuo no mínimo igual à potência média solicitada durante esta condição mais severa.

Dependendo dos valores levantados acima, esta condição pode ocorrer na parada das unidades geradoras ou na partida da primeira unidade, por exemplo, considerando-se a carga inicial e a possível partida de uma carga significativa;

- Premissa de dimensionamento 12: de posse da potência elétrica do gerador, deve-se verificar se a maior corrente solicitada pela carga não excede, por exemplo, a duas vezes a corrente nominal do gerador elétrico escolhido.

Assim, através da equação (4) de potência aparente e dos valores de $\cos \varphi$, calculam-se os valores da corrente de partida tanto da carga referente à carga inicial como da carga referente à possível partida de uma carga significativa.

$$S = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad \text{equação (4)}$$

Em seguida, com a soma destas duas correntes de partida, obtém-se a corrente total I_{CP} , cujo valor é necessário para verificação da queda de tensão (vide premissa de

dimensionamento 13). Posteriormente, determina-se a potência mínima do gerador elétrico;

- Premissa de dimensionamento 13: em seguida, efetuar uma verificação da queda de tensão, quando da partida do maior motor sob condição mais severa. Neste caso, estabelecer % de queda de tensão (por exemplo, de 15%). Através da equação (5), abaixo, e com o valor da reatância subtransitória de eixo direto (X''_d), pode-se obter a corrente nominal e compará-la com os critérios admitidos.

$$\Delta U = (X''_d \cdot I_{CP} / I_N) / (1 + X''_d \cdot I_{CP} / I_N) \quad \text{equação (5)}$$

Naturalmente, encontrando-se valores indesejáveis, conflitantes com as premissas adotadas, o gerador elétrico deverá ser recalculado;

- Premissa de dimensionamento 14: deve-se evitar que a variação de frequência interfira no dimensionamento do motor. Para tal, caso necessário, adotar possibilidade operacional do gerador acima da tensão nominal (em geral de 380 V/220 V);
- Premissa de dimensionamento 15: finalmente, reverifica-se a padronização, agora do grupo motor diesel-gerador, visando facilitar as opções de compra, quer seja pela configuração do tipo “usina diesel” como pela configuração do tipo “grupo singelo”.

4. “USINA DIESEL” PARA USINA HIDRELÉTRICA COM TRÊS UNIDADES HIDROGERADORAS

A seguir, será apresentado um exemplo de configuração de serviços auxiliares e o modo operante da “usina diesel” como fonte de emergência de uma usina hidrelétrica com três unidades hidrogeradoras, a qual será denominada de “Usina Hidrelétrica X”. Para tal, serão adotadas algumas premissas.

4.1. PREMISSAS DE CONFIGURAÇÃO ADOTADAS

Estas premissas são inerentes ao projeto em questão e, assim, podem ser uma referência para outros empreendimentos, uma vez que os critérios de projeto e configuração da usina hidrelétrica, bem como sua função no sistema elétrico, interferem diretamente na fixação destas pré-condições.

Neste item, o autor utilizou sua vivência profissional na área de engenharia de sistemas elétricos e de coordenação de fornecimentos de equipamentos, além da interação com empresas projetistas elétricas e com fornecedores. Esta vivência profissional é resultante de consolidações de especificações técnicas, de critérios de projeto, memoriais de cálculo e de diagramas unifilares, os quais foram elaborados no desenvolvimento de projeto reais.

Neste contexto, a “Usina Hidrelétrica X” representa um exemplo próximo de soluções já adotadas em usinas hidrelétricas..

O que está previsto no nosso projeto inicial é a interface com os pontos provenientes dos grupos diesel geradores (casa de força e vertedouro) através de contatos secos (para sinais digitais) e de corrente de 4-20 mA, para sinais analógicos.

- Premissa de configuração 1: o empreendimento é composto de bloco gerador (casa de força, tomada d’água e vertedouro) e da subestação seccionadora ou de manobra, cuja distância à casa de força viabiliza a distribuição de energia em baixa tensão;
- Premissa de configuração 2: a “Usina Hidrelétrica X” possui três unidades hidrogeradoras

entre 100 MVA e 150 MVA (gerador elétrico vertical acoplado a turbina hidráulica do tipo Kaplan);

- Premissa de configuração 3: junto à casa de força, há três transformadores de potência abaixadores auxiliares, derivados das saídas de fases de cada gerador, como fontes de energia primárias interna para as cargas dos serviços auxiliares elétricos;
- Premissa de configuração 4: a distribuição de energia elétrica em corrente alternada para os serviços auxiliares elétricos da casa de força e da subestação é feita em baixa tensão com variação de +10% e -5%, sendo 380/220 V trifásico para motores e cargas maiores e de 220 V (para iluminação, tomadas e cargas menores);
- Premissa de configuração 5: a usina possui dois painéis de distribuição geral de corrente alternada (PDG's A e B), análogos entre si, e cada um deles é capaz de "alimentar" todas as cargas da "Usina Hidrelétrica X";
- Premissa de configuração 6: em condições normais de operação, os painéis PDG's estão energizados pelos transformadores auxiliares referentes às unidades hidrogeradoras 1 e 3 . Logo, só os disjuntores de entrada destes painéis, referentes a estes dois alimentadores, estão fechados;
- Premissa de configuração 7: os painéis PDG-A ou PDG-B são os alimentadores de cada centro de comando de motores, os quais são executados com barra dupla, porém sem segregação de cargas essenciais das não essenciais. Assim, as barras A e B dos CCM's "alimentam", normalmente, tanto cargas essenciais como cargas não essenciais;
- Premissa de configuração 8: a casa de força da "Usina Hidrelétrica X" possui dois transformadores de potência abaixadores auxiliares como fontes de energia secundária, proveniente de alimentação externa da concessionária local (através de um dos dois painéis de alimentação externa em média tensão);
- Premissa de configuração 9: como fonte de energia emergencial, junto à casa de força, há uma "usina diesel" composta de dois grupos singelos (grupo motor diesel-gerador 1 e 2) para suprir as cargas essenciais (selecionadas por um sistema de alívio de cargas) da casa

de força e da subestação seccionadora da usina hidrelétrica.

Deverá ser fornecido um painel de sincronismo completo que abrigará: o controlador automático de sincronismo, incluindo a verificação das pré-condições de paralelismo; o sistema de divisão de cargas (LS - load sharing) e um disjuntor extraível motorizado para efetuar o paralelismo dos grupos motor diesel-gerador.

- Premissa de configuração 10: cada grupo motor diesel-gerador da “usina diesel” é projetado com capacidade para garantir a parada segura das três unidades hidrogeradoras e projetado para operação em paralelo. Portanto, os reguladores de velocidade e de tensão deverão ser apropriados para esta exigência, incluindo a “escorva do campo” do gerador (“field-flashing”).
- Premissa de configuração 11: quanto ao grupo motor diesel-gerador, têm-se as seguintes condições:
 - Os grupos motor diesel-gerador terão sistema de arrefecimento para refrigeração dos motores e um sistema de pré-aquecimento para o óleo lubrificante (função da temperatura local) e para a água de arrefecimento (mínimo de 50 °C);
 - Tempo necessário para estabilização de tensão e velocidade (frequência) para assumir 50% da carga prevista em 10 s e, para o paralelismo, de 10 a 15 s;
 - Cada grupo motor diesel-gerador terá duas baterias que alimentarão dois motores de arranque que atuarão alternadamente nas partidas consecutivas quando houver falha de partida, por exemplo;
 - Em caso de falha na primeira partida, o grupo motor diesel-gerador será submetido a até cinco tentativas consecutivas de partida, com tempo médio de 5s entre cada uma;
 - Os grupos motor diesel-gerador serão fornecidos com sistema de exaustão e silencioso, além de amortecedores de vibração.
 - Os grupos motor diesel-gerador deverão atender as Normas Técnicas pertinentes e

aplicáveis, tais como Normas da ABNT, ANSI, IEC, NEMA, DIN e VDE .

- Premissa de configuração 12: a distância entre o vertedouro e a casa de força é tal que inviabiliza a distribuição de energia em baixa tensão. Então, o vertedouro possui dois transformadores de potência abaixadores auxiliares como fontes de energia primária, proveniente de alimentação externa (em média tensão, da concessionária local).

Estas fontes estão eletricamente intertravadas de forma a impedir paralelismo de fontes. Logo, a distribuição de energia elétrica CA para os auxiliares elétricos do vertedouro é em 380/220 V trifásico ou 220 V monofásico (igual à “premissa de configuração 4”);

- Premissa de configuração 13: o vertedouro também possui uma fonte de energia de emergência que é composta de um grupo motor diesel-gerador singelo. Em caso de falta da energia externa, o vertedouro será suprido pela sua fonte emergencial;
- Premissa de configuração 14: a aquisição de energia das fontes externas da concessionária local poderá ser feita de modo temporário (para a casa de força, no caso de perda de uma ou mais fontes primárias) ou de modo permanente (para o vertedouro).

Além disso, deverá atender aos requisitos regulatórios de instituições pertinentes, tais como Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) - no tocante a medição e faturamento e transmissão de dados;

- Premissa de configuração 15: os motores possuem um sistema de partidas escalonadas, isto é, é prevista uma temporização entre as partidas dos motores;
- Premissa de configuração 16: numa situação de emergência, com parada forçada das unidades, o pulmão de pressurização do ar de regulação é projetado para suportar até 03 oscilações e os mancais das unidades são previstos para até 2 min sem circulação de óleo;
- Premissa de configuração 17: o tempo necessário para lógica de transferência de fontes é da ordem de 5 s;

4.2. DESCRIÇÃO FUNCIONAL DA CASA DE FORÇA

A seguir será apresentada uma descrição funcional da “Usina Hidrelétrica “X” que focará os serviços auxiliares da casa de força. Isto, porque na casa de força, conforme a “premissa de configuração 9” do item 4.1., está prevista a instalação de uma “usina diesel”, objeto desta dissertação. Portanto, esta descrição não abrangerá o vertedouro que, conforme “premissa de configuração 13” do item 4.1., possuirá um "grupo singelo”.

Assim, em condições normais de operação, as cargas dos serviços auxiliares elétricos em corrente alternada serão supridas pelas unidades hidrogeradoras através de 03 fontes primárias, sendo duas específicas (cada uma delas dedicada a um painel de distribuição geral (PDG)) e uma comum aos dois painéis de distribuição geral, quando na falta de uma ou mais das fontes dedicadas.

Assim, os demais painéis e cargas da casa de força e subestação da “Usina Hidrelétrica X” serão energizados através dos painéis de distribuição geral.

Na ausência de uma fonte específica e da fonte comum (perda de um dos painéis de distribuição geral), as cargas alimentadas por este painel serão transferidas, automaticamente, para o outro painel de distribuição geral. Assim, cada PDG é projetado para alimentar toda a carga dos serviços auxiliares elétricos da “Usina Hidrelétrica X”.

Em caso de perda de todas as fontes primárias (as duas específicas e a comum), os painéis de distribuição geral serão alimentados pela fonte secundária externa, via painel de alimentação externa 1 ou 2 (vide “premissa de configuração 8” (item 4.1));

Na ausência das alimentações primárias internas e secundária externa (perda total das fontes de energia) serão dados comandos para as paradas das unidades hidrogeradoras e a usina diesel assumirá as cargas essenciais em regime de emergência, através de um sistema automático de alívio de cargas executado nos CCM’s. Esta fonte de emergência é composta por dois grupos motor diesel-gerador (GMG1 e GMG2), sendo que, durante a perda das fontes primárias e da secundária, a energia dos grupos motor diesel-gerador será transmitida

às cargas essenciais através dos painéis de distribuição geral (PDGA e B).

O “grupo motor diesel-gerador 1” será conectado por cabos ao “painel de distribuição geral A” a partir de seu “painel do grupo motor diesel-gerador 1” (PGD1). Igualmente, o “grupo motor diesel-gerador 2” será conectado por cabos ao “painel de distribuição geral B”, a partir do “painel do grupo motor diesel-gerador 2” (PGD2). Para a realização de paralelismo (após sincronização), os painéis PGD1 e 2 são interligados ao painel de sincronismo (PSIN) que concentra os dispositivos elétricos e eletrônicos para a verificação das pré-condições de sincronismo.

Os centros de comando de motores (CCM's), distribuídos pela casa de força e demais estruturas do empreendimento, terão como fontes alimentadoras os painéis de distribuição geral. e, para se evitar o paralelismo destas fontes, terão dois disjuntores de entrada e um de acoplamento intertravados eletricamente de tal forma que, em condições normais de operação, cada barra é alimentada por um lado do sistema de serviços auxiliares, permanecendo o disjuntor de acoplamento aberto.

A “Figura 22” a seguir, originária da “Figura 15”, porém incluindo as fontes externas, ilustra o acima descrito. Observa-se, porém, que os pontos de conexão (indicadas por *) de linhas geométricas contínuas (que representam barras ou interligações elétricas) não são pontos de conexão elétrica. Analogamente à “Figura 15”, o transformador auxiliar referente ao gerador hidrelétrico G2 representa a fonte interna primária comum e os geradores D1 (ou GMG1) e D2 (ou GMG2) representam os “grupos singelos” que constituem a “usina diesel”.

Também estão indicados os transformadores de potência abaixadores auxiliares (os de “sangria” e os de alimentação externa); as barras dos painéis de distribuição geral dos lados A e B (PDGA e PDGB), a barra do painel de sincronismo e paralelismo dos “grupos singelos” da “usina diesel” (PSIN), as barras dos painéis do grupo diesel (PGD1 e 2) e as barras de um centro de comando de motores (CCM) típico, como ilustração.

Os quadrados contínuos representam os disjuntores e as linhas tracejadas, o intertravamento elétrico parcial (referente ao gerador G1) entre os disjuntores das fontes, de transferência e de

acoplamento (indicado na barra do CCM). Nesta figura, também não estão indicadas as saídas (dos painéis de alimentação externa) para o vertedouro, conforme as “premissas de configuração 8 e de 12 a 14” (vide item 4.1.) e os intertravamentos elétricos dos GMG’s.

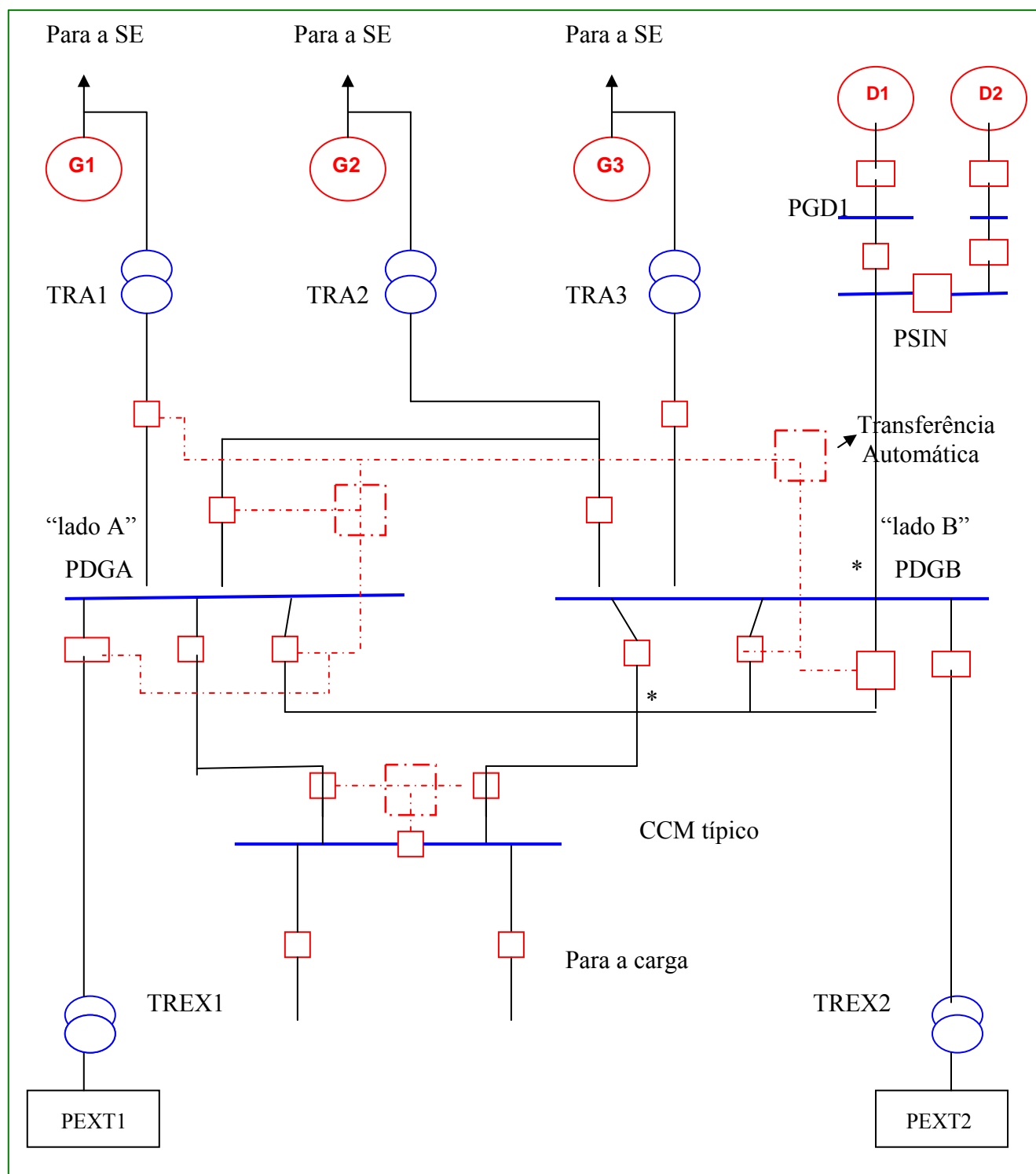


Figura 22-Desenho unifilar geral dos serviços auxiliares elétricos de uma usina hidrelétrica
Fonte: VSPA (2004)

Observa-se na “Figura 22” que os disjuntores representados após os grupos motor diesel-gerador (D1 e D2) são trifásicos opcionais e inseridos próximos aos terminais de fases dos grupos.

A presença desses disjuntores protegerá os “grupos singelos” para quaisquer faltas (curto-circuito) que possam vir a ocorrer no trecho entre os “grupos singelos” D1 e D2 até os painéis dos grupos diesel (PGD1 e 2) e destes até os disjuntores de entrada do painel de sincronismo e paralelismo (PSIN).

4.2.1 Transferência automática

Em cada painel do grupo diesel (PGD) de cada “grupo singelo” da “usina diesel” e em cada painel de distribuição geral (PDG’s 1 e 2) da casa de força, há um sistema de transferência automática de fontes de energia projetado para assegurar a continuidade de fornecimento de energia elétrica para os serviços auxiliares.

Esta transferência é independente uma da outra e alimentada em 220 V, 60 Hz, a partir das entradas de cada painel.

Na falta de uma das fontes de energia elétrica, o sistema de transferência automática, após verificação da ausência de tensão elétrica na barra, comuta a “alimentação” para a fonte de energia elétrica seguinte, porém, dentro de uma hierarquia pré-estabelecida:

- Fonte primária interna específica;
- Fonte primária interna comum;
- Fonte secundária externa;
- Transferência de alimentação, nos centros de controle dos motores (painéis CCM’s), para a outra fonte primária interna específica (caso presente) e, caso ausente, o passo seguinte;
- Fonte de emergência, no caso de “blackout”, ou seja, perda das fontes primárias internas

(as duas específicas e a comum) e perda da fonte secundária externa.

Neste contexto, considerando-se o “lado A” da configuração unifilar apresentada na “Figura 22”, têm-se as quatro opções de transferências a seguir:

- Opção 1 - perda da fonte primária específica do lado A:

Em condições normais, as cargas dos serviços auxiliares da “Usina Hidrelétrica X” estão sendo supridas pelos painéis de distribuição geral (PDGA e B), onde cada painel possui quatro fontes de alimentação devidamente intertravadas eletricamente. Estas fontes são:

- Uma fonte interna específica de seu respectivo lado (A ou B);
- Uma fonte interna comum (originária da unidade hidrogeradora G2);
- Uma fonte interna específica do outro lado (B ou A) e
- Uma fonte de emergência (oriunda ou de um “grupo singelo” não “paralelado” ou da “usina diesel” (com os dois grupos motor diesel-gerador em paralelismo)).

Assim, em condições normais, nos painéis de distribuição geral (PDGA e B) só os disjuntores referentes aos alimentadores primários específicos é que estarão fechados e, nos CCM's, os disjuntores de acoplamento de suas barras A e B estarão abertos.

Ao faltar tensão da fonte primária específica do lado A, o sistema de transferência automático verificará, através de sensores de tensão, se há tensão proveniente da fonte primária interna comum.

Em caso afirmativo, o disjuntor da fonte primária inoperante será aberto, o disjuntor referente à fonte comum será fechado e os demais alimentadores permanecerão abertos.

- Opção 2 - perda da fonte primária específica do lado A e ausência da primária comum:

O sistema de transferência automático verificará a presença de tensão proveniente da fonte

secundária externa da casa de força (PEXT1 ou PEXT2) e, caso afirmativo, o alimentador da fonte específica do lado A será aberto, enquanto o disjuntor de entrada (referente à fonte externa) no painel de distribuição geral do lado A (PDGA) será fechado. Os demais alimentadores permanecerão abertos.

- Opção 3 - perda da fonte primária específica do lado A; ausências da fonte primária comum e da fonte secundária externa; presença da fonte primária específica do lado B:

Caso a fonte externa não esteja disponível, após o tempo de retardo necessário para verificação de transferência de fontes, o sistema de transferência automático iniciará a comutação para o lado B (nos diversos CCM's), mediante abertura de seus disjuntores de entradas do lado A e, em seguida, o fechamento dos disjuntores de acoplamento de suas respectivas barras duplas.

No painel de distribuição geral (PDGA), nesta situação, será aberto o alimentador referente à sua fonte específica e os demais permanecerão abertos, ou seja, todos os alimentadores estarão abertos.

Ao retornar a tensão, de qualquer das fontes primária ou secundária no lado A, o sistema retornará automaticamente à situação original, obedecendo a seqüência de fontes definidas anteriormente.

- Opção 4 - “Blackout”, perda total das fontes primárias (ausência de tensão proveniente dos transformadores de potência de serviços auxiliares abaixadores (instalados nas saídas de fases dos geradores elétricos 1, 2 e 3 da Usina)) e perda da fonte secundária (ausência de tensão proveniente dos transformadores auxiliares abaixadores instalados após o painel PEXT1 e 2 (fonte externa)):

Nesta situação de “blackout”, após o tempo decorrido para verificação de transferência de fontes e de lado, será dado comando para parada de todas as unidades hidrogeradoras e, para garantir as paradas seguras das mesmas, serão dados comandos de partidas aos grupos motor diesel-gerador (GMG1 e 2) e será dado um comando para inicialização do sistema de alívio de cargas.

Este alívio de cargas irá desconectar as cargas não essenciais e permitirá que somente continuem conectadas as cargas essenciais para a integridade do empreendimento (segurança e telecomunicação mínimas) e para que a parada forçada das unidades hidrogeradoras ocorra sem riscos de danos materiais.

Após a partida, estabilização de tensão e de velocidade dos “grupos motor diesel-gerador 1 e 2”, serão abertos, nos painéis de distribuição geral, os disjuntores referentes às fontes específicas e serão fechados os disjuntores dos alimentadores referentes à “usina diesel”.

Desse modo será efetivado o alívio de cargas e, naturalmente, os demais disjuntores permanecerão no estado “aberto”.

Assim, a “usina diesel” (ou seja, cada “grupo singelo”) é projetada para estar apto a assumir as cargas essenciais num intervalo de 10 a 15s após as partidas dos GMG’s (supondo que não haja falha na partida de nenhum deles). Estas cargas, conforme já comentado, são as cargas necessárias para se garantir a parada segura das três unidades hidrogeradoras.

Simultaneamente, o painel de sincronismo e paralelismo (PSIN) iniciará o processo de verificação das pré-condições de sincronismo dos “grupos singelos” (GMG1 e 2) e, após o sincronismo, o paralelismo será efetuado.

Caso o paralelismo falhe, o “grupo singelo” da “usina diesel” que teve a partida com êxito permanecerá alimentando um dos lados dos serviços auxiliares (ou A ou B), semelhante à situação de alimentação por fontes primárias internas específicas (condições normais de operação), porém, neste caso, com alívio de cargas (somente as cargas essenciais).

Na pior hipótese de um dos “grupos singelos” não entrar em operação (decorridas cinco tentativas), o “grupo singelo” remanescente terá capacidade de atender a parada segura das três unidades geradoras.

Para tal, haverá transferência de cargas do lado correspondente ao outro grupo singelo (que está inoperante), para o lado que está energizado pelo grupo diesel em operação (vide “premissa de configuração 10” do item 4.1. acima).

Esta transferência se dará nos centros de comando de motores (CCM's), semelhante ao descrito na opção 3 acima, porém, com alívio de cargas (somente as cargas essenciais).

Dessa forma, ressalta-se que, independentemente de haver paralelismo dos dois grupos motor diesel-gerador ou somente um “grupo singelo” estiver em operação, só serão supridas as cargas essenciais imprescindíveis para a operação da “Usina Hidrelétrica X”.

Pelo acima exposto, fica evidente a flexibilidade operacional da fonte de energia elétrica de emergência quando concebida na filosofia “usina diesel” em detrimento da configuração “grupo singelo” que, ao falhar nas partidas consecutivas, coloca em risco todo o empreendimento hidrelétrico.

Portanto, a confiabilidade da concepção “usina diesel” é muito maior que a filosofia de um único grupo motor diesel-gerador, desde que a “premissa de configuração 10” (indicada no item 4.1. desta dissertação) seja considerada no dimensionamento e no fornecimento dos grupos motor diesel-gerador integrantes da “usina diesel”.

Além do mais, a possibilidade de se fazer manutenção e testes preventivos em um “grupo singelo” tendo o outro “grupo singelo” como reserva capaz de atender às cargas essenciais, aumenta mais ainda a confiabilidade da concepção “usina diesel”.

Para os casos de “usina diesel” com mais de dois “grupos singelos”, pode-se projetar que cada conjunto de dois grupos singelos em paralelismo seja capaz de atender os serviços auxiliares elétricos essenciais para a condição crítica de dimensionamento do grupo diesel. (vide item 3.6.3 desta dissertação).

Numa primeira análise, tem-se a impressão de que está havendo custos desnecessários para a usina hidrelétrica.

Porém, quando comparado com implicações decorrentes da indisponibilidade da usina hidrelétrica perante o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) e também quando comparado com as perdas de receita monetária devido a não operação das unidades hidrogeradoras, o cenário muda radicalmente.

Sem contar o provável prejuízo causado por eventuais danos às unidades hidrogeradoras que tiveram que realizar as paradas forçadas sem os serviços auxiliares essenciais energizados.

Portanto, torna-se evidente a grande vantagem da adoção de fonte de energia elétrica na concepção “usina diesel” para o empreendimento.

4.2.2 Sistema de alívio de cargas

Complementando a “premissa de configuração 9” (item 4.1), têm-se as seguintes observações para o sistema de alívio de cargas:

- O envio de sinais para se desligar as cargas não essenciais, alimentadas pelos CCM's, ocorre quando se inicia a partida dos “grupos singelos” GMG1 e GMG2;
- O alívio de cargas é efetuado quando for comandado o fechamento dos disjuntores referentes aos grupos motor diesel-gerador nos painéis de distribuição geral;
- O alívio de cargas é efetuado em cada CCM pela operação de um relé em cada uma das barras (A e B), que desligará a fonte de controle do demarrador dos motores considerados “não essenciais” e os manterá desligados enquanto os grupos motor diesel-gerador estiverem em operação até a efetiva “volta” de uma fonte de alimentação não emergencial;
- O alívio de cargas será cancelado, automaticamente, ao retornarem as fontes normais e ainda quando houver reenergização da usina hidrelétrica (black-start), ou poderá ser cancelado através de um comando do SDSC (sistema digital de supervisão e controle) da “Usina Hidrelétrica X”;
- Na presença de tensões nos lados A ou B, após um intervalo predeterminado de tempo, a configuração original é restituída de forma automática. Em seguida, é dado o comando de parada aos grupos motor diesel-gerador.

4.2.3. Controle e supervisão de grupos motor diesel-gerador

Os equipamentos integrantes do Sistema de Controle e Supervisão dos grupos motor diesel-gerador GMG1 e GMG2 serão instalados nos painéis do grupo diesel (que nada mais é que um painel de comando automático local (PGD1 e 2)).

Serão estes painéis que possuirão comandos de operações local e remoto, selecionados através de chave seletora de duas posições.

Na posição local, os “grupos singelos” GMG1 e GMG2 serão comandados a partir dos respectivos painéis de comando local, por meio de botoeiras.

Na posição remota, os “grupos singelos” serão comandados por sinal externo, através de contatos livres de potencial, sendo previstos tanto o comando remoto de partida como o comando remoto de parada.

Na ocorrência de qualquer anormalidade, tais como falha de partida, pressão de óleo lubrificante baixa, temperatura excessiva do motor, etc., o sistema de controle executará as seguintes funções:

- Parar o grupo motor diesel-gerador e atuar no dispositivo de bloqueio, impedindo novo comando de partida, até que o operador intervenha, restabelecendo o sistema;
- Atuar em sistema de alarme local, com sinalização individual para cada função e com rearme manual;
- Atuar num contato individual, livre de potencial, para cada falha. Estes contatos serão ligados ao sistema digital de supervisão e controle (SDSC) da “Usina Hidrelétrica X” o que permitirá uma supervisão remota dos “grupos singelos”.

4.2.4. Partida e parada de grupos motor diesel-gerador

Quanto ao processo de partida, tem-se:

- O sistema de partida automática dos grupos motor diesel-gerador receberá um pulso para partida, seja pelo comando local ou pelo remoto, e iniciará o ciclo de partida do motor diesel com, inclusive, o envio de sinais para os CCM's desligarem as cargas não essenciais.
- Caso algum grupo motor diesel-gerador da “usina diesel” não parta na primeira tentativa, o sistema de partida executará automaticamente cinco novas tentativas, em intervalos ajustáveis de aproximadamente cinco (5) segundos, alternando as baterias e motores de arranque (vide “premissa de configuração 11” no item 4.1.).

Após a última tentativa sem sucesso, o sistema de controle bloqueará o GMG e acionará o alarme.

- Quando os valores de tensão e de frequência, previstas para assumir cargas, forem estabelecidos e detectados por sensores do sistema auxiliar elétrico, presentes nos painéis do grupo diesel (PDG1 e 2), serão dados comandos de fechamento aos disjuntores alimentadores das barras desenergizadas (sem as fontes primárias e secundária) dos painéis de distribuição geral (PDGA e B).
- Concomitantemente à partida dos “grupos singelos” da “usina diesel”, ocorrerá verificação das pré-condições de sincronismo dos mesmos e, em seguida, será executado o paralelismo, através do fechamento do disjuntor de paralelismo, instalado no painel de sincronismo e paralelismo PSIN da “usina diesel”.

Neste momento, o alívio de cargas nos centros de comando de motores referentes às unidades hidrogeradoras e às cargas essenciais é efetuado e o processo de transferência de cargas é concretizado.

A “Figura 23” seguinte apresenta a vista frontal deste painel.



Figura 23-Vista frontal de um painel de sincronismo e paralelismo de uma “usina diesel”
Fonte: Maquigeral

Quanto ao processo de parada, tem-se:

- Ao ser dado comandos de parada (pulso), seja a partir do comando local ou do comando remoto, haverá nova transferência de cargas, ou seja, a carga será “retirada” dos grupos motor diesel-gerador GMG1 e 2 e “devolvida” às fontes normais. O sistema de sincronismo e paralelismo deverá voltar à condição inicial.
- Os grupos motor diesel-gerador GMG1 e 2 continuarão operando sem carga, por um período, recomendado pelo fabricante, suficiente para um bom arrefecimento. Ao final deste período, o motor deverá parar e permanecer apto a receber novo comando de partida.

4.3. ANÁLISE TÉCNICA

Pelo acima exposto e pelas premissas de configuração adotadas (item 4.1) é feita a seguinte análise técnica:

Quanto ao grupo motor diesel-gerador singelo ou “grupos singelos” compondo “usina diesel”:

- A tecnologia atual de grupos motor diesel-gerador permite que o mesmo, após o sinal de partida, esteja apto a assumir 50% das cargas (admitindo que não haja falha de partida) em até 10 s.
- O tempo para se efetuar o paralelismo está um torno de 15 s, considerando--se 5 s para o segundo “grupo singelo” assimilar a referência de tensão e de freqüência do primeiro grupo (que já está conectado na barra do painel de sincronismo e paralelismo (PSIN)).

Caso a “usina diesel” tenha mais de dois grupos motor diesel-gerador em paralelo, o tempo para os demais sincronizarem é mínimo, praticamente quase que instantâneo.

Portanto, a tecnologia atual dos fornecedores de grupos motor diesel-gerador, isto é “o estado da arte”, atende a “premissa de configuração 11” (vide item 4.1).

De fato, no caso mais otimista (sem falhas nas partidas dos grupos), haverá um tempo total de até 30 s para se ter o paralelismo. Já no caso mais pessimista, tem-se o êxito na partida de um “grupo singelo” (por exemplo, GMG1) e o êxito na partida do outro “grupo singelo” (no caso, o GMG2) somente após as 5 tentativas permitidas. Acrescentando-se os tempos de lógica de transferência (“premissa de configuração 17” - vide item 4.1) e de paralelismo, tem-se um tempo total da ordem de no máximo 55 s para se ter a “usina diesel” operando em paralelismo.

- Quanto aos requisitos de gerenciamento e divisão de cargas (load sharing), a tecnologia atual de diversos fornecedores de grupo diesel atende plenamente o exigido, uma que os mesmos são feitos de forma automática e segura. Também, são atendidas as exigências de proteção, monitoramento e transmissão de dados (há vasta lista de fornecimento de grupos diesel inclusive como cogeração e sincronismo na rede elétrica das concessionárias).

- A inadequada circulação de 3º harmônico é contornável com a “suspensão” do neutro, deixando uma unidade aterrada, caso necessário. Ou com o uso de um transformador de aterramento na barra de geração da “usina diesel”.
- Em geral, as empresas já mantêm um plano de manutenção preventivo que inclui até simulações de partida e de carregamento (“assumir carga”), o que favorece a vida útil do grupo motor diesel-gerador (GMG).
- Para um perfeito funcionamento do GMG e seu pleno uso durante a vida útil do mesmo, os fabricantes recomendam que o grupo motor diesel-gerador opere com uma carga mínima que, em geral, é em torno de 30% do valor da classificação de potência para o qual foi projetado. Tal procedimento é necessário para se evitar a carbonização das camisas do motor diesel, uma vez que, operando abaixo de 30%, poderá não ser atingida a temperatura mínima e nem se garantirá a queima adequada do combustível.

Desse modo, a concepção de “usina diesel” (com 02 grupos singelos) permite que, caso necessário, possa ser atendido um carregamento de 15% do valor total, bastando para isso, o funcionamento de apenas um “grupo singelo” da “usina diesel” com 30% da carga da “usina diesel”, o que mostra sua maior flexibilidade.

Quanto às unidades hidrogeradoras:

- Os fabricantes de hidrogeradores já concebem mancais que operam, sem a presença de óleo lubrificante e sem refrigeração, por tempo acima de 2 min, ou seja, o suficiente para a “usina diesel” efetuar o paralelismo, mesmo na pior hipótese (55 s).

Logo, tecnicamente, não há restrições ao uso de usina diesel em usina hidrelétrica, restando uma análise do ponto de vista econômico, conforme a seguir efetuada.

5. EXEMPLO COMPARATIVO DE USINA DIESEL E GRUPO SINGELO

Observa-se que o autor optou por exemplos com 900 e 650 kVA por se tratarem de valores próximos a soluções de 03 unidades hidrogeradoras na faixa de 100 a 150 MVA (conforme “premissa de configuração 3” - vide item 4.1) abrangendo casos com turbinas Kaplan e Francis.

5.1. EXEMPLO PARA 900 kVA - CONTÍNUO

A “Tabela 5.1” indica valores de um “grupo singelo” e de uma “usina diesel” composta de dois “grupos singelos”, cuja potência total é igual a potência da opção único grupo.

Trata-se de dados de fevereiro de 2003, obtidos de uma proposta do fabricante “um” e com motor do fabricante “A”.

A “Tabela 5.2” representa a os valores da “Tabela 5.1”. atualizados para fevereiro de 2006, segundo os seguintes critérios:

- Cotações do dólar (USA) comercial: fonte www.calculos.com/consulta10.php - média dos valores médios mensais (de compra e de venda)
- Índices IGP-M: www.fgvdados.com.br/dsp_gratuitas.asp
- Atualização (correção) do dólar (USA): www.calculos.com/consulta10.php - aplicada a taxa de desvalorização do Dólar (USA) perante ao Euro. Este valor foi obtido da relação Euro/Dólar (USA), média dos valores médios mensais (de compra e de venda).
- Não foram considerados o aumento de custo do aço no mercado internacional e o atual aumento de consumo de grupos diesel;

5.2. EXEMPLO PARA 650 kVA – CONTÍNUO

As “Tabelas 5.3 e 5.5” são idênticas e indicam valores de um grupo singelo e de uma “usina diesel” de potência total equivalente, composta de dois grupos singelos.

Trata-se de dados de setembro de 2002, obtidos de uma proposta do fabricante “dois” e como motor fabricante “B” e propositalmente foram utilizadas duas vezes pelo autor para facilitar a comparação imediata com as “Tabelas 5.4 e 5.6”, respectivamente.

As “Tabelas 5.4. e 5.6” representam a os valores da “Tabela 5.3” atualizados para fevereiro de 2006 segundo os critérios abaixo:

- Cotações do dólar (USA) comercial: fonte www.calculos.com/consulta10.php - média dos valores médios mensais (de compra e de venda)
- Índices IGP-M: www.fgvdados.com.br/dsp_gratuitas.asp
- Atualização (correção) do dólar (USA): www.calculos.com/consulta10.php - aplicada a taxa de desvalorização do Dólar (USA) perante ao Euro. Este valor foi obtido da relação Euro/Dólar (USA), média dos valores médios mensais (de compra e de venda).
- Não foram considerados o aumento de custo do aço no mercado internacional e o atual aumento de consumo de grupos diesel;
- A “Tabela 5.4” foi atualizada pelos índices acima mencionados e sem o expurgo parcial da variação do IGP-M no período em questão;
- A “Tabela 5.6” foi atualizada considerando um expurgo parcial do IGP-M. Assim, foi aplicado pelo autor um expurgo nos índices de do IGP-M de 09/2002 a 02/2003 visando eliminar o efeito da eleição presidencial de 2002 pois, neste período, registrou-se um aumento significativo nos índices do IGP-M (o que distorce a análise). Assim, a variação do IGP-M foi reduzida de 18,65% (de 09/2002 a 02/2003) para 6% (média geométrica da variação do IGP-M de 02/2003 a 02/2006).

Tabela 5.1 - Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 900 kVA - Fevereiro/2003

Fabricante 1 Motor A (maior custo) 900 kVA	GDG em R\$ Fevereiro/2003	GDG em US\$ Fevereiro/2003	Adaptação usina hidrelétrica - Em R\$ Fevereiro/2003	Cotação do dólar Fevereiro/2003 (1)	Comparativo em R\$ Fevereiro/2003	Diferença em R\$ entre usinas diesel e grupo singelo	Diferença em kVA entre usinas diesel e grupo singelo
Opção 1: Usina com 02 grupos singelos	350.000,00		70.000,00		420.000,00	-37,46%	-7,10%
Opção 2: 01 único grupo diesel singelo		170.000,00	49.000,00	3,6625	671,625,00	100,00%	100,00%

Tabela 5.2 - Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 900 kVA - Fevereiro/2006

Fabricante 1 Motor A (maior custo) 900 kVA	GDG em R\$ Fevereiro/2006 IGP-M (2)	GDG em US\$ Fevereiro/2006 (3)	Adaptação usina hidrelétrica - Em R\$ Fevereiro/2006 IGP-M (2)	Cotação do dólar Fevereiro/2006 (1)	Comparativo em R\$ Fevereiro/2006	Diferença em R\$ entre usinas diesel e grupo singelo	Diferença em kVA entre usinas diesel e grupo singelo
Opção 1: Usina com 02 grupos singelos	417.445,00 (+ 19,27%)		83.489,00 (+19,27%)		501.934,00	+10,24%	-7,10%
Opção 2: 01 único grupo singelo		185.378,20 (+ 9,046%)	58.442,30 (+19,27%)	2,136 (-41,68%)	454.410,00	100,00%	100,00%

- 1) Cotações do dólar (USA) comercial: fonte www.calculos.com/consulta10.php - média dos valores médios mensais de compra e de venda
- 2) Atualização do dólar (USA): fonte www.calculos.com/consulta10.php - relação dólar/Euro (média dos valores médios mensais (de compra e de venda)
- 3) Índices IGP-M: fonte www.fgvdados.com.br/dsp_gratuitas.asp

Tabela 5.3 – Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 650 kVA - Setembro/2002

Fabricante 2 Motor B (menor custo) 650 kVA	GDG em R\$ Setembro/2002	GDG em US\$ Setembro/2002	Adaptação usina hidrelétrica-Em R\$ Setembro/2002	Cotação do dólar Setembro/2002 (1)	Comparativo em R\$ Setembro/2002	Diferença em R\$ entre usinas diesel e grupo singelo	Diferença em kVA entre usinas diesel e grupo singelo
Opção 1: Usina com 02 grupos singelos	190.000,00		39.000,00		229.000,00	-22,80%	+4,40%
Opção 2: 01 único grupo diesel singelo		85.000,00	28.000,00	3,16	296.600,00	100,00%	100,00%

Tabela 5.4 – Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 650 kVA – Fevereiro/2006 - Sem expurgo parcial do IGP-M

Fabricante 2 Motor B (menor custo) 650 kVA	GDG em R\$ Fevereiro/2006 IGP-M (2)	GDG em US\$ Fevereiro/2006 (3)	Adaptação usina hidrelétrica-Em R\$ Fevereiro/2006 IGP-M (2)	Cotação do dólar Fevereiro/2006 (1)	Comparativo em R\$ Fevereiro/2006	Diferença em R\$ entre usinas diesel e grupo singelo	Diferença em kVA entre usinas diesel e grupo singelo
Opção 1: Usina com 02 grupos singelos	268.850,00 (+41,50%)		55.185,00 (+41,50%)		324.035,00	+25,05%	+4,40%
Opção 2: 01 único grupo diesel singelo		100.459,80 (+ 18,188%)	39.620,00 (41,500%)	2,136 (-32,405%)	260.500,00	100,00%	100,00%

1) Cotações do dólar (USA) comercial: fonte www.calculos.com/consulta10.php - média dos valores médios mensais de compra e de venda

2) Atualização do dólar (USA): fonte www.calculos.com/consulta10.php - relação dólar/Euro (média dos valores médios mensais (de compra e de venda)

3) Índices IGP-M: fonte www.fgvdados.com.br/dsp_gratuitas.asp

Tabela 5.5 – Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 650 kVA - Setembro/2002

Fabricante 2 Motor B (menor custo) 650 kVA	GDG em R\$ Setembro/2002	GDG em US\$ Setembro/2002	Adaptação usina hidrelétrica-Em R\$ Setembro/2002	Cotação do dólar Setembro/2002 (1)	Comparativo em R\$ Setembro/2002	Diferença em R\$ entre usinas diesel e grupo singelo	Diferença em kVA entre usinas diesel e grupo singelo
Opção 1: Usina com 02 grupos singelos	190.000,00		39.000,00		229.000,00	-22,80%	+4,40%
Opção 2: 01 único grupo diesel singelo		85.000,00	28.000,00	3,160	296.600,00	100,00%	100,00%

Tabela 5.6 – Comparativo entre “usina diesel” e “grupo singelo” de 650 kVA – Fevereiro/2006 - Com expurgo parcial do IGP-M

Fabricante 2 Motor B (menor custo) 650 kVA	GDG em R\$ Fevereiro/2006 IGP-M (2)	GDG em US\$ Fevereiro/2006 (3)	Adaptação usina hidrelétrica-Em R\$ Fevereiro/2006 IGP-M (2)	Cotação do dólar Fevereiro/2006 (1)	Comparativo em R\$ Fevereiro/2006	Diferença em R\$ entre usinas diesel e grupo singelo	Diferença em kVA entre usinas diesel e grupo singelo
Opção 1: Usina com 02 grupos singelos	240.203,70 (+26,423%)		49.304,97 (+26,423%)		289.508,67	+15,81%	+4,40%
Opção 2: 01 único grupo diesel singelo		100.459,80 (+ 18,188%)	35.398,44 (26,423%)	2,136 (-32,405%)	249.980,57	100,00%	100,00%

- 1) Cotações do dólar (USA) comercial: fonte www.calculos.com/consulta10.php - média dos valores médios mensais de compra e de venda
- 2) Atualização do dólar (USA): fonte www.calculos.com/consulta10.php - relação dólar/Euro (média dos valores médios mensais (de compra e de venda)
- 3) Índices IGP-M: fonte www.fgvdados.com.br/dsp_gratuitas.asp
- 4) Expurgo do “efeito eleição-2002” no IGP-M: de 18,65% (de 09/2002 a 02/2003) para 6% (média geométrica de 02/2003 a 02/2006)

5.3. ANÁLISE ECONÔMICA

- “Tabela 5.1 “

Observando-se a “Tabela 5.1”, num cenário onde 1US\$ = R\$3,6625, sem dúvida alguma a aplicação de “usina diesel” é favorável, uma vez que seu preço é 37,5% mais barato.

A diferença indicada no comparativo de potências deve-se à escolha de família de motor para adequar a potência equivalente, neste caso, a usina diesel é cerca de 7% menor, porém, atende o solicitado que é disponibilizar uma potência contínua de 900kVA.

Em termos de espaço (lay-out) a “usina diesel” ocupa uma área maior. Observando as dimensões da “Tabela 3.5”, constata-se que a área ocupada pelo “grupo singelo” é de 7,6m² enquanto a ocupada pela “usina diesel” é de 10,3m² (observar que há necessidade mínima de 1m entre as unidades singelas).

Logo, a “usina diesel” ocupa um espaço cerca de 36% maior (2,7 m² a mais) o que, para a implantação da sala do diesel na usina hidrelétrica não representa problemas significativos (exceto para os casos de usina em caverna ou em casos onde a solução de implantação exige altos custos de engenharia civil, por exemplo, muita escavação em rocha).

Naturalmente, o diferencial de área varia dependendo da combinação motor (modelo e fabricante) diesel e gerador e deve ser focado de forma absoluta (m²) e não de forma relativa (%).

Em termos de manutenção, segundo informações de fabricantes, a “usina diesel” apresenta um custo semelhante ao “grupo singelo” para o caso de manutenção preventiva. Porém, para manutenção corretiva, o custo da “usina diesel” é cerca de 15% inferior.

Além do que, há soluções de contrato de manutenção com monitoramento do grupo diesel feito remotamente pelo fabricante que passa a ter acesso e monitoramento remoto das principais grandezas o que permite ao fabricante analisar o desempenho e ter histórico do

equipamento. Outros fabricantes têm soluções próximas em termos de call-center.

Quanto às peças sobressalentes, em geral os fabricantes as disponibilizam em tempos iguais, tanto para a solução “usina diesel” como para a filosofia “grupo singelo”.

Porém, uma intervenção mais severa (recuperação) de um motor diesel importado levará, em média, três vezes mais tempo que o fabricado no Brasil.

Assim, excetuando a ocupação de espaço maior, certamente a “usina diesel” é mais viável que um único motor diesel importado.

- “Tabela 5.2 “

Observando-se a “Tabela 5.2”, num cenário onde $1\text{US\$} = \text{R\$}2,136$, com valores atualizados segundo os critérios acima indicados, a “usina diesel” passará de uma condição favorável (-37,5%) para uma situação desfavorável (+10,24%), comparando-a com um “grupo singelo”. Mas deve-se ressaltar que numa relação cambial $\text{US\$}/\text{R\$} = 2,39$, esta diferença aproxima-se de zero.

Entretanto, considerando-se os efeitos positivos quanto à manutenção, confiabilidade e disponibilidade (nas “premissas de configuração” apresentadas nesta dissertação – item 4.1) e considerando-se o incremento no mercado nacional, apesar da ocupação de uma área maior no layout, deve-se efetuar uma análise financeira criteriosa.

Esta análise deve incluir os impactos do aumento do aço, as implicações da demanda por grupos diesel atualmente aquecida, bem como e considerar as flutuações das taxas cambiais e incentivos fiscais.

Tal análise visa oferecer elementos (subsídios) ao cliente de tal forma que o mesmo possa decidir qual a melhor opção: “grupo singelo” ou “usina diesel”.

- “Tabela 5.3”

Observando-se a “tabela 5.3”, num cenário onde $1\text{US\$} = \text{R\$}3,16$, sem dúvida alguma a aplicação de “usina diesel” é favorável, uma vez que a o preço da “usina diesel” era cerca de 23% mais barata que um “grupo singelo”, apesar da área ocupada ser cerca de 10m^2 maior.

Quanto à diferença de potências e demais fatores, são aplicáveis as análises feitas para as “Tabelas 5.1 e 5.2”.

- “Tabela 5.4”

Observando-se a “Tabela 5.4”, num cenário onde $1\text{US\$} = \text{R\$}2,136$, a solução “usina diesel” passa de uma situação favorável de 23% mais barata para uma condição de 25% mais cara que um “grupo singelo”.

Entretanto, conforme opinião do autor, houve neste cenário uma contaminação do IGP-M devido ao efeito “eleição presidencial” o que é retratado na variação do IGP-M (cerca de 18,65% em praticamente meio ano, de 09/2002 a 02/2003).

Este incremento percentual dificulta a análise uma vez que é quase igual à variação do IGP-M (19,27%) ocorrida nos três anos seguintes (02/2003 a 02/2006).

Por esta razão, o autor promoveu um expurgo parcial nos índices do IGP-M de 09/2002 a 02/2003, conforme indicado na “Tabela 5.6”, ou seja, reduziu de 18,65% para 6% (valor correspondente à média geométrica da variação de 02/2003 a 02/2006).

Quanto à diferença de potências e demais fatores, são aplicáveis as análises feitas para as “Tabelas 5.1 e 5.2”.

Deve-se ressaltar que numa relação cambial $\text{US\$}/\text{R\$} = 2,83$, esta diferença aproxima-se de

zero e que neste período houve uma queda de quase 33% nesta relação. Em se mantendo esta diferença, somente após uma criteriosa análise técnico-econômica é que se poderá definir a melhor opção entre “grupo singelo” ou “usina diesel”.

- “Tabela 5.5”

A “Tabela 5.5” é idêntica à “Tabela 5.3”, cuja análise já foi efetuada anteriormente. Entretanto, conforme já indicado, o autor optou por repetir a “Tabela 5.3” (com numeração 5.5) para melhorar a visualização impressa e, com isso, facilitar a comparação com a “Tabela 5.6”.

- “Tabela 5.6”

Com a aplicação do expurgo parcial no IGP-M, a variação do mesmo passa de 41,5% para 26,423%. Nesta condição, observando a “Tabela 5.6”, num cenário onde 1US\$ = R\$2,136, a solução “usina diesel” passa de uma situação favorável de 23% mais barata (“Tabela 5.3”) para uma condição de 16% mais cara (“Tabela 5.6”). Quanto à diferença de potências e demais fatores, são aplicáveis as análises feitas para as “Tabelas 5.1 e 5.2”.

Destaca-se também que numa relação cambial US\$/R\$ = 2,53, esta diferença aproxima-se de zero e que neste período houve uma queda de quase 33% nesta relação.

Neste patamar de diferencial, considerando-se os efeitos positivos quanto à manutenção, flexibilidade, confiabilidade e disponibilidade (nas “premissas de configuração” apresentadas nesta dissertação – item 4.1) e considerando-se o incremento no mercado nacional, apesar da ocupação de uma área maior no layout (10m²), deve-se efetuar uma análise financeira criteriosa.

Tal análise visa oferecer elementos (subsídios) ao cliente de tal forma que o mesmo possa decidir qual a melhor opção: “grupo singelo” ou “usina diesel”.

6. CONCLUSÃO

Do ponto de vista técnico, pelo desenvolvido nesta dissertação, o autor conclui que a solução “de usina diesel” é plenamente aplicável em usinas hidrelétricas. Tal afirmação decorre do fato de o mercado nacional ter ampla experiência e tecnologia no conceito de “usina diesel” (concepção, paralelismo, divisão de cargas, tempo para assumir cargas, confiabilidade, flexibilidade, disponibilidade, etc) e ampla experiência e tecnologia na concepção e fabricação de unidades hidrogeradores (exigências de mancais, por exemplo).

Dessa forma, considerando-se a “usina diesel” composta de “grupos singelos” usada como exemplo no item 4 desta dissertação, e complementando a análise técnica efetuada no item 4.3 acima, o autor conclui que é viável o uso de “usina diesel” em usinas hidrelétricas, conforme as premissas de configuração aqui discutidas. De fato:

- Quanto à questão de carregamento e divisão de cargas, a tecnologia atual dos fabricantes de grupos motor diesel-gerador permite que o mesmo, após o sinal de partida, esteja apto a assumir 50% das cargas (admitindo que não haja falha de partida) em até 10 s num único “passo”.

Nos casos em que se é permitido assumir cargas sem atingir a tensão nominal e frequência nominal (atingindo cerca de 90% dos valores nominais) este tempo, dependendo do fabricante, poderá ser ainda menor.

Também, dependendo do fabricante e das condições de temperatura e do sistema de pré-aquecimento, havendo necessidade, pode-se assumir até 100% das cargas em até 10 s após o comando de partida dos grupos motor diesel-gerador (admitindo que haja sucesso na primeira tentativa de partida dos “grupos singelos”).

Quanto à divisão de cargas, a tecnologia atual de diversos fornecedores de grupo motor diesel-gerador atende plenamente os requisitos referentes ao gerenciamento e divisão de cargas (load sharing) de forma automática, segura e permite operação com controle isolado ou conjunto, similar ao controle de potência das unidades hidrogeradoras.

Outro ponto favorável à concepção “usina diesel” é o fato de se poder operar com valores de carga menores que 30% da classificação de potência total da “usina diesel”, sem comprometer as camisas dos cilindros devido ao processo de carbonização.

De fato, por exemplo, a concepção de “usina diesel” (com 02 grupos singelos) permite que, caso necessário, possa ser atendido um carregamento de no mínimo 15% do valor total, bastando para isso, o funcionamento de apenas um “grupo singelo” da “usina diesel” com 30% da carga da “usina diesel”, evidenciando sua flexibilidade e disponibilidade.

- Quanto ao tempo para se efetuar o paralelismo, através de controladores e reguladores microprocessados, é constatado na prática um tempo da ordem de até 15 s, considerando-se até 5 s para o segundo “grupo singelo” assimilar a referência de tensão e de frequência do primeiro grupo motor diesel-gerador que já está conectado na barra do painel de sincronismo e paralelismo (PSIN).

Caso a “usina diesel” tenha mais de dois grupos motor diesel-gerador em paralelo, a partir do segundo, o tempo para os demais sincronizarem nas barras é mínimo, ou seja, é quase que instantâneo. Portanto, a tecnologia atual dos fornecedores de grupos motor diesel-gerador, isto é “o estado da arte”, atende plenamente a “premissa de configuração 11” (vide item 4.1).

Assim, no caso mais otimista, não havendo falhas nas partidas dos grupos motor diesel-gerador, haverá um tempo total de até 30 s para se ter o paralelismo, considerando-se o tempo de transferência de fontes.

No caso mais pessimista, tem-se o êxito na partida de um “grupo singelo” (por exemplo, GMG1) e o êxito na partida do outro “grupo singelo” (no caso, o GMG2) somente após as 5 tentativas permitidas.

Neste caso, conforme já apresentado, antes do “grupo singelo” operante (GMG1) assumir toda a carga essencial (para a parada segura das três unidades), o processo de tentativas de partidas é iniciado e esgotado.

Assim, o tempo médio decorrido para “grupo singelo” GMG2 estar energizando a barra de

seu painel já está em torno de 35 s. (conforme “premissa de configuração 11” - vide item 4.1 desta dissertação).

Acrescentando os tempos de lógica de transferência (“premissa de configuração 17” - vide item 4.1) e de paralelismo, tem-se um tempo total da ordem de no máximo de 55 s para se ter a “usina diesel” apta a operar com plena capacidade.

- Também, não há dificuldades de se atender as exigências de proteção, monitoramento e transmissão de dados, uma vez que são fornecidos grupos motor diesel-gerador para áreas diversas (conforme “Tabelas 3.6 e 3.7”), inclusive como cogeração e sincronismo na rede elétrica das concessionárias.

Mais uma vez, a “usina diesel” se destaca no tocante à flexibilidade e disponibilidade frente às perturbações decorrentes de manobras de grandes cargas de forma brusca (entrada ou rejeição de cargas).

No caso “grupo singelo”, caso as faixas de variação de tensão e de frequência, mesmo com atuação dos reguladores, permanecerem fora da faixa projetada o sistema de proteção comandará o indesejável desligamento da fonte de emergência.

Entretanto, para a concepção de “usina diesel” a desligamento total da energia emergencial é muito mais improvável.

Isto porque o sistema de proteção irá desligar somente a unidade singela que não está respondendo às atuações dos reguladores, permanecendo as demais íntegras que fornecerão energia parcial, o que vem a reforçar a flexibilidade desta concepção.

- Quanto à circulação de 3º harmônico, inerente à construção física dos geradores elétricos, similarmente às PCH's ou até mesmo aos grandes projetos, é contornável com a “suspensão” do neutro, deixando uma unidade aterrada, caso necessário.

Ou, ainda, a instalação de um transformador de aterramento na barra de geração da “usina diesel” (vide “Figura 21”) mantendo-se, assim, os “grupos singelos” sem aterramento do neutro dos enrolamentos do gerador elétrico.

Observa-se que os enrolamentos do transformador de aterramento podem estar na configuração “zig-zag” ou na configuração “estrela / triângulo”, como exemplos.

Para tal, devem ser efetuados estudos adequados de proteção bem como um correto dimensionamento do transformador de aterramento, anteriormente mencionado.

Em geral, o neutro do fechamento estrela do gerador elétrico do grupo motor diesel-gerador é acessível e aterrado. Como em qualquer caso, atenção deve ser dada ao sistema de aterramento.

- Quanto ao quesito manutenção, é prática usual das companhias de geração incluir no programa de manutenção das usinas hidrelétricas um monitoramento e um plano de manutenção dos grupos motor diesel-gerador.

Tal plano inclui as manutenções preventivas e as simulações de partida e de carregamento (“assumir carga”), fato que certamente contribuirá para redução de índices de falhas na partida dos “grupos singelos” que formam a “usina diesel” e, conseqüentemente, na redução da sua indisponibilidade.

Além do mais, o fato de se ter mais de um grupo, permite à equipe de operação e manutenção uma indiscutível flexibilidade e confiabilidade das fontes de emergência.

- Por outro lado, já há usinas diesel em operação em algumas plantas hidrelétricas de empresas geradoras tradicionais.

A “Tabela 6.1” seguinte indica uma série de usinas hidrelétricas no Brasil e valores de potência de fonte de emergência.

Nesta tabela, são indicados os as potências totais das unidades hidrogeradoras, os tipos de turbina e a configuração e potência do grupo diesel empregado.

Tabela 6.1-Exemplos de grupo motor diesel em usinas hidrelétricas

Potência total da Usina hidrelétrica	tipo de turbina	fonte de emergência para casa de força	
		tipo configuração	potência
3.500 MW	Francis	“usina diesel”	2 x 550 kVA
1.600 MW	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 1.500 kVA
		“usina diesel”	3 x 450 kVA
850 MW	Francis	“usina diesel”	4 x 350 kVA
350 MW	Kaplan	“usina diesel”	4 x 350 kVA
130 MW	Francis	“usina diesel”	2 x 450 kVA
1.600 MW	Kaplan	“hidrogerador“	2 x 4,5 MVA
1.400 MW	Francis	“grupo singelo”	1 x 1.250 kVA
1.000 MVA	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 2.000 kVA
630 MW	Francis	“grupo singelo”	1 x 1.000 kVA
550 MVA	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 1.500 kVA
450 MVA	Francis	“grupo singelo”	1 x 500 kVA
350 MVA	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 1.000 kVA
300 MW	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 350 kVA
150 MW	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 355 kVA
150 MW	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 300 kVA
140 MW	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 500 kVA
110 MW	Francis	“grupo singelo”	1 x 300 kVA
100 MW	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 350 kVA
90 MW	Francis	“grupo singelo”	1 x 200 kVA
80 MVA	Francis	“grupo singelo”	1 x 280 kVA
80 MW	Kaplan	“grupo singelo”	1 x 355 kVA
80 MW	Bulbo	“grupo singelo”	1 x 450 kVA

Fonte: Concessionárias de geração de energia elétrica – maio de 2006

- Observando a “Tabela 6.1”, constata-se que não há uma “regra de três” simples para se obter a potência do grupo motor diesel-gerador. O seu dimensionamento depende de vários fatores, a saber:
 - Tipo de turbina (turbina tipo Kaplan é a que mais exige carga em termos de bomba de regulação);
 - Quantidade de unidades hidrogeradoras;
 - Filosofia de operação dos serviços auxiliares elétricos;
 - Critérios de definição de cargas essenciais e de demandas;
 - Critérios de dimensionamento do grupo motor diesel-gerador;
 - Grau de redundância desejado e exigências do sistema elétrico;
 - Especificações e critérios da projetista de engenharia elétrica e do cliente; etc.

A “Tabela 6.1” também indica que há usinas hidrelétricas que utilizam unidades hidrogeradoras auxiliares para os serviços auxiliares elétricos e que há usinas em que estão instaladas as duas concepções de fonte de emergência, ou seja, tanto a filosofia “grupo singelo” como o conceito de “usina diesel”.

Quanto às unidades hidrogeradoras:

- Os fabricantes de hidrogeradores, do ponto de vista de severidade aos mancais e a necessidade de regulação das unidades hidrogeradoras (perante fortes oscilações), possuem tecnologia de fabricação que atende plenamente a “premissa de configuração 16” (item 4.1 desta dissertação), ou seja, 2 mm sem circulação de óleo e até 03 oscilações que obrigam atuações mais radicais do mecanismo de regulação das turbinas.
- Os fabricantes de hidrogeradores, do ponto de vista de severidade aos mancais e a necessidade de regulação das unidades hidrogeradoras (perante fortes oscilações), possuem tecnologia de fabricação que atende plenamente a “premissa de configuração 16”

(item 4.1 desta dissertação), ou seja, 2 min sem circulação de óleo e até 03 oscilações que obrigam atuações mais radicais do mecanismo de regulação das turbinas.

De fato, conforme indicado no segundo subitem desta conclusão, a “usina diesel” estará apta a “assumir” cargas em menos de um minuto (até 55s, na pior hipótese) e os mancais da unidade hidrogeradora (tanto os de guia como os de escora e combinados) são projetados para ficarem sem a injeção e a circulação do óleo por um tempo superior (cerca de 2 min).

Este tempo e o quesito “despressurização do ar de regulação” variam conforme os fabricantes e exigências de clientes, uma vez que estas premissas e exigências de projeto são pré-consolidadas na fase de proposta e detalhadas durante o projeto executivo.

Assim, do ponto de vista técnico, o autor reforça sua conclusão de que não há objeções ao uso de “usina diesel” em usina hidrelétrica, restando, todavia, uma análise do ponto de vista econômico.

Quanto à análise econômica, os quesitos de manutenção, peças de reserva e ainda o incentivo à indústria nacional são altamente significativos e representam fatores que irão se contrapor à flutuação cambial, atualmente desfavorável à escolha da solução “usina diesel”.

Porém, para uma relação cambial US\$/R\$ acima de 2,34 o cenário torna-se favorável à usina diesel de 900 kVA e, para uma relação US\$/R\$ acima de 2,45, uma “usina diesel” de 650 kVA irá se tornar mais vantajosa que um “grupo singelo” equivalente.

Logo, o autor conclui que a “usina diesel” é perfeitamente viável tecnicamente. Em termos econômicos, somente após uma análise mais criteriosa onde deverão ser levados em conta também as flutuações cambiais, as variações nos preços da matéria prima, os incentivos fiscais e variações de demanda por grupo motor diesel-gerador. Como indicativo, valem as relações cambiais (US\$/R\$) de 2,39 e de 2,53 para os casos de 900 kVA e de 650 kVA (com expurgo do IGP-M).

7. RECOMENDAÇÃO

Como recomendação, o autor sugere que sejam efetuados trabalhos que tenham por objetivo diminuir as cargas essenciais a serem supridas pelo grupo motor diesel-gerador e, com isso, reduzir a potência dos grupos diesel, quer sejam na configuração “grupo singelo” ou na concepção “usina diesel”:

- Aplicação de partidas soft-start visando à diminuição de solicitações na partida de motores;
- Revisão de critérios para: adoção de cargas essenciais, definição de demanda instantânea e de demanda média para usina hidrelétrica;
- Elaboração de software para efetuar uma integração de diversos dados e condições, tais como: relação de cargas totais (essenciais, permanentes e de ponta); as condições operativas das unidades hidrogeradoras; as premissas de configuração, o dimensionamento do grupo motor diesel-gerador e a análise financeira anteriormente citada. Tal software visará à simulação de situações diversas das expostas nesta dissertação de mestrado.

Por fim, o autor espera ter contribuído com a discussão deste tema e ter oferecido uma visão sistematizada que orientará o entendimento da questão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de informações de geração. Capacidade de geração do Brasil. Disponível em: <www.aneel.gov.br/15.htm>. Acesso em: 02 mar.2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de informações de geração. Capacidade de geração do Brasil. Matriz de energia elétrica. Disponível em: <www.aneel.gov.br/15.htm>. Acesso em: 02 mar. 2006

COPEM ENGENHARIA; VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION. **Grupo diesel, critérios de projeto para dimensionamento**. São Paulo, 2005.

CUMMINS POWER GENERATION: **Manual de aplicação**: grupos geradores arrefecidos a água. São Paulo, Cummins Brasil Ltda. 182p. (Catálogo T-30d-07).

DEBIT. **Consulta indicadores**: Dólar comercial [compra e venda]. Disponível em: <www.calculos.com/consulta10.php>. Acesso em: 02 mar. 2006

DEBIT. **Consulta indicadores**: Euro - US\$ [compra e venda]. Disponível em: <www.calculos.com/consulta10.php>. Acesso em: 02 março2006

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Índice Geral de Preços do Mercado, IGP-M. [Número índice mensal]. Disponível em: <www.fgvdados.com.br/dsp_gratuitas.asp>. Acesso em: 02 mar.2006

LEME ENGENHARIA; VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION. **Grupo diesel e serviços auxiliares elétricos:** especificações técnicas, memorial de cálculo e critérios de projeto para dimensionamento. São Paulo, 2004.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Portaria número 303 de 18/11/2004. Disponível em: <www.mme.gov.br/site/search.do?previousQuery=portaria+303&pageNum=8>. Acesso em: 02 mar 2006

PANDIARAJ, K.; FOX, B.; MORROW, D. J.; PERSAUD, S.; MARTIN, J. P. Centralized control of diesel gen-sets for peak shaving and system support. **IEEE Proceedings Generation Transmission and Distribution**, v.149, n.2, p.126-132, Mar. 2002.

PEREIRA, J. C. **Motores e Geradores. Princípio de funcionamento: instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores.** 122p. Disponível em: < www.joseclaudio.eng.br/diesel.html >. Acesso em: 23 fev.2006.

QUATER ENGENHARIA; VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION. **Grupo diesel:** especificações técnicas, memorial de cálculo e critérios de projeto para dimensionamento. Belo Horizonte, 2003.

SIMONE, A.G. **Centrais e aproveitamentos hidrelétricos.** São Paulo, Érica, 2003. 246p.

STEMAC GRUPOS GERADORES. **Tabela de potências e dimensões de linha diesel 60 Hz.**, 2005. 12p. (Catálogo técnico número 050.011.0034 rev. 01).

VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION. **Curso interno de usina hidrelétrica,** VSPA. São Paulo, 2002.

YOSHIDA, Walter T. Anexo - Resumo potencial e cogeração diesel. Disponível em: [<yoshida@cogensp.com.br>](mailto:yoshida@cogensp.com.br). Acesso em: 23 fev.2006

NOTA: Não são do conhecimento do autor referências bibliográficas sobre o tema desta dissertação no meio acadêmico. Este conceito encontra-se nas empresas fornecedoras de soluções integradas do empreendimento eletromecânico, empresas fabricantes ou fornecedoras de equipamentos e empresas projetistas. Algumas das referências acima são de empresas que participaram de projetos em que o autor trabalhou efetivamente, tendo, então, acesso aos conceitos consolidados conjuntamente e a colaboração das mesmas, conforme já citado no item 3.1.