



## **Critérios para Conexão de Geradores Assíncronos na Rede de Distribuição de Média Tensão**

**Álvaro P. César**  
CEMIG Distribuição S.A  
[apaulino@cemig.com.br](mailto:apaulino@cemig.com.br)

**Fernando Pantuzzo**  
CEMIG Distribuição S.A  
[pantuzzo@cemig.com.br](mailto:pantuzzo@cemig.com.br)

### **RESUMO**

Este trabalho objetiva apresentar os requisitos técnicos para a conexão de geradores assíncronos à rede de distribuição de média tensão da CEMIG e compara o seu desempenho com o de máquinas síncronas funcionando na mesma condição

O gerador assíncrono tem as seguintes vantagens sobre as máquinas síncronas:

- É de construção mais simples e robusta, porque não tem excitatriz, regulador de tensão e dispensa dispositivo de sincronização.
- Têm maior estabilidade estática do que os hidrogeradores de pólos salientes.
- Libera pouca potência quando ocorre um curto circuito no ponto de conexão.
- Pode funcionar desassistido.
- Seu custo é menor do que o do gerador síncrono

As desvantagens da PCH com gerador assíncrono são:

- Não pode funcionar em sistema isolado, porque não tem controle de tensão.
- Retira o reativo para sua excitação da rede pública.
- Exige a instalação de capacitores para a compensação do reativo solicitado da rede..

## **PALAVRAS-CHAVE**

Acessante, Conexão, Gerador Assíncrono, PCH, Redes de Distribuição.

## **1. INTRODUÇÃO**

Visando atender a consultas de interessados em conectar pequenas centrais hidrelétricas à rede de média tensão da CEMIG, com gerador assíncrono, foram feitos estudos das características de funcionamento da máquina assíncrona como gerador, bem como suas vantagens e desvantagens sobre a máquina síncrona nas mesmas condições. Com a atual política do governo de incentivo à geração distribuída, os geradores assíncronos podem se constituir em uma alternativa econômica aos geradores síncronos, em usinas de pequena potência. A máquina assíncrona é mais simples e, portanto, mais barata do que a síncrona de mesma potência e tensão. Em pequenos aproveitamentos hidroelétricos o custo do gerador é decisivo para a implementação do projeto. Quando a PCH se situa em locais remotos, a vantagem do gerador de indução torna-se ainda maior, porque a usina funciona desassistida, como acontece na Europa há décadas. Por seu lado, o gerador síncrono pode necessitar de manutenções periódicas, como por exemplo na excitatriz e no regulador de tensão. Há casos em que o proprietário desativa a PCH quando os custos de manutenção do gerador são altos. Embora raro no Brasil, o gerador assíncrono é usado há várias décadas na Europa por pequenos proprietários rurais conectados ao sistema público de distribuição. Em países como Alemanha, França e Portugal há inúmeras PCH desse tipo funcionando desassistidas, durante anos seguidos, sem apresentar falhas, graças à robustez e simplicidade da máquina assíncrona. O prazo de entrada em serviço da PCH com gerador assíncrono é menor do que o de outros sistemas geradores, bem como o seu custo de instalação. A rapidez de entrada em serviço dessas PCH, pode ajudar a atender a demanda do alimentador até que sejam realizados investimentos na expansão das SE. A descrição do funcionamento do gerador de indução foi baseada principalmente nas referências 2 e 6 do anexo 1. As aplicações práticas foram tiradas das referências 7 e 8. Os critérios de acesso foram baseados nas referências 1, 4 e 5. O modelo de circuito da máquina de indução foi baseado na referência 3. O fluxo de potência que forneceu os dados das tabelas de 2 a 9 foi rodado com o aplicativo PSS-ADEPT-5.2, da Siemens. A principal conclusão deste trabalho é que o gerador de indução poderá ser uma opção vantajosa, principalmente para PCH de até 500 kW, por seu baixo custo inicial e quase ausência de manutenção. Quando conectado em pontos do alimentador distantes da subestação, de forma análoga ao gerador síncrono, reduz substancialmente as perdas e melhora o nível de tensão no horário de ponta. Ademais, no caso abordado no item 4, o gerador de indução do acessante não causou sobretensão no horário de carga leve; em seu lugar, um gerador síncrono de mesma capacidade causaria pequena sobretensão, embora em número reduzido de pontos. Desligando parte dos capacitores na carga leve, essa sobretensão não ocorreria com nenhuma das máquinas. Foi necessário substituir um banco de capacitores de 900 kvar por 3 bancos de 300 kvar cada um, reinstalados em pontos mais distantes da PCH, para que o gerador do acessante pudesse fornecer sua potência nominal sem causar sobretensões muito grandes. No exemplo do item 4 deste trabalho os capacitores não são chaveados, porém mantidos em operação também no horário fora de ponta. Com os capacitores da rede da concessionária operando em todos os postos horários, não há necessidade, na maioria dos casos práticos, de que o acessante instale seu próprio capacitor para a excitação do gerador assíncrono. A facilidade de conexão, a simplicidade de operação e a quase ausência de manutenção favorecem o gerador de indução, comparado ao gerador síncrono, para pequenos aproveitamentos hidroelétricos. Entretanto, é óbvio que o gerador síncrono é insubstituível e insuperável nas grandes usinas, devido à sua capacidade de regular a tensão e a frequência do barramento, além de fornecer a potência reativa para as cargas que drenam corrente em atraso.

## **2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO GERADOR ASSÍNCRONO**

A máquina assíncrona pode ser conectada à rede pública com qualquer velocidade. Na aplicação como gerador, a máquina é conectada à rede inicialmente como motor, após atingir 90% ou 95% da velocidade síncrona (90% em máquinas menores do que 500 kVA e 95% em máquinas maiores). Como a inércia do motor de indução é acelerada previamente pela máquina motriz, a corrente de partida do motor é reduzida. O módulo e a frequência nominal da tensão do ponto de conexão, da mesma forma que no motor de indução, são impostos pela rede pública. Da mesma forma que o motor

de indução, o gerador assíncrono não tem excitação própria e por isso só pode funcionar ligado à rede pública. A maioria dos geradores assíncronos funciona com deslizamento negativo de 5%, quando passam a liberar sua potência nominal. Quando o motor de indução é acionado a uma velocidade superior à de sincronismo, no mesmo sentido de rotação de funcionamento como motor, o deslizamento torna-se negativo. Os condutores do rotor passam a cortar o fluxo do campo rotativo em sentido contrário ao de funcionamento como motor. O sentido das corrente do rotor agora se inverte em relação ao funcionamento como motor. Por um efeito semelhante ao de um transformador as correntes do rotor induzem no estator correntes praticamente defasadas de  $180^\circ$  em relação à componente ativa da corrente original do estator no funcionamento como motor. O motor de indução, por conseguinte, pode funcionar como gerador, mas com certas limitações em relação ao alternador síncrono. A passagem do efeito motor para gerador pode ser explicado com o auxílio da figura 1, onde, por simplicidade não aparece a corrente magnetizante.

A corrente total do estator,  $I_M$ , no funcionamento como motor, é o vetor soma de  $I_o$  e  $-I_2$ .  $-I_2$  é o reflexo da corrente do rotor ( $I_2$ ) no estator. Com o aumento da velocidade do rotor  $-I_2$  diminui até que o rotor alcança a velocidade síncrona; nessa hora a extremidade do vetor  $-I_2$  cai no ponto P, e  $-I_2$  se anula. Agora resta apenas  $I_o$ , que é a corrente de excitação e também a corrente total do estator. A energia necessária para vencer os atritos e a resistência do ar é suprida pela máquina primária, e as perdas no núcleo, pela linha da concessionária. Acima da velocidade de sincronismo, o lugar geométrico da corrente do estator permanece ainda no arco NQ. Um pequeno aumento da velocidade faz com que a extremidade do vetor corrente do estator caia no ponto P'; o fator de potência cai a zero e cessa a troca de energia entre a máquina e a linha da concessionária. A máquina passa a suprir apenas as perdas de seu núcleo. Um aumento de velocidade, a partir do ponto P' faz crescer a corrente  $I_2$  do rotor. Nesse momento a corrente  $I_G$  é dada pelo vetor soma de  $I_o$  e  $I_2$ . O vetor  $-I_2$ , reflexo no estator da corrente do rotor, sofreu praticamente uma inversão de fase. Tanto  $-I_2$  como  $I_2$  ficam agora aproximadamente em concordância de fase, respectivamente, com a tensão terminal  $V'_M$  e com  $V'_G$ . Assim, tanto  $-I_2$  como  $I_2$  podem ser consideradas como correntes ativas. Portanto, ao se acionar o rotor a uma velocidade acima da de sincronismo, a corrente ativa do estator sofre uma inversão de fase, e a máquina muda seu funcionamento de motor para gerador. Durante essa transição, a grandeza e a fase do fluxo de entreferro variam muito pouco. A corrente de excitação, representada pelo vetor OP', que gera o fluxo, fica praticamente constante, tanto em grandeza como em fase.

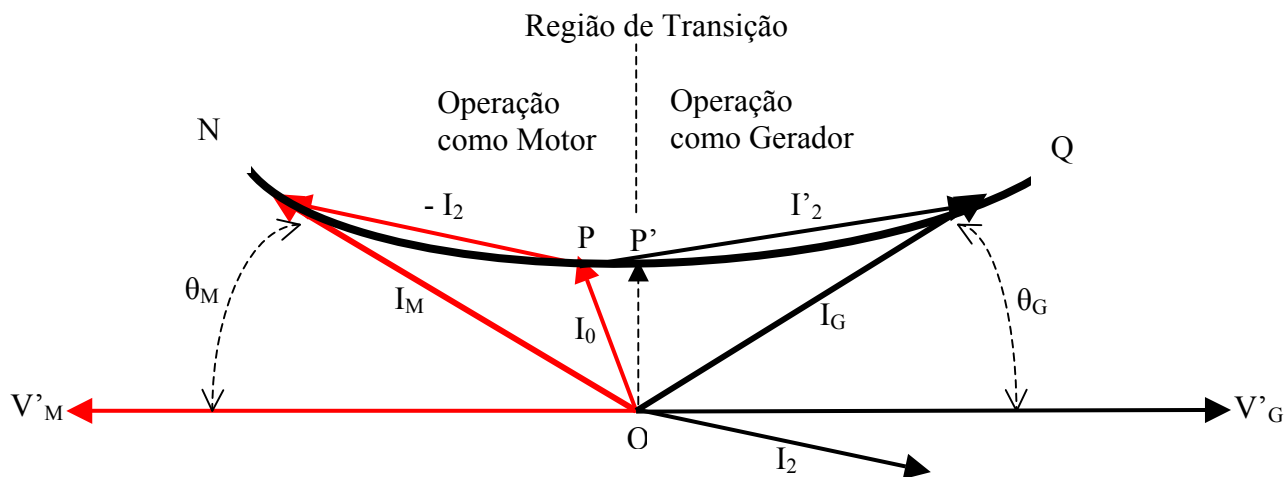


Figura 1 – Ação de motor e de gerador de indução

O gerador de indução passa a entregar uma corrente em avanço, com um fator de potência  $\theta_G$ . O fato de só fornecer corrente em avanço é um inconveniente do gerador de indução, porque a maioria das cargas comerciais e industriais é indutiva e necessita de corrente em atraso. Ademais, o gerador de indução retira toda a sua excitação da linha da concessionária, tal qual o motor de indução. Na figura 1 o fasor representado por  $OP'$  é aproximadamente igual à corrente de excitação, a mesma para funcionamento como gerador. O gerador de indução não consegue fornecer sua própria corrente de excitação, uma vez que  $I_2$  não passa de uma corrente ativa, sem componente em atraso. O gerador de indução não pode fornecer a corrente em atraso solicitada pela carga, conforme indicado na figura 2. A figura 2 mostra a corrente de carga  $I_c$ , com atraso de  $\alpha$  radianos sobre a tensão terminal  $V$ . Essa corrente tem uma componente ativa  $I_e$ . Há necessidade de uma corrente em avanço  $I_o$ , mais ou menos equivalente a  $OP'$  da figura 1 e uma corrente  $I_q$ , em atraso. A corrente  $I_G$ , resultante de  $I_e$  e  $I_o$ , é a corrente total fornecida pelo gerador de indução, a este valor de carga. A rede da concessionária deve fornecer a diferença entre a corrente da carga e a corrente do gerador de indução e, nesse caso, não entrega nenhuma potência ativa. Toda sua corrente,  $I_s$ , está em quadratura e equivale à soma aritmética da corrente de excitação do gerador de indução  $I_o$  e da corrente em quadratura atrasada da carga,  $I_q$ .

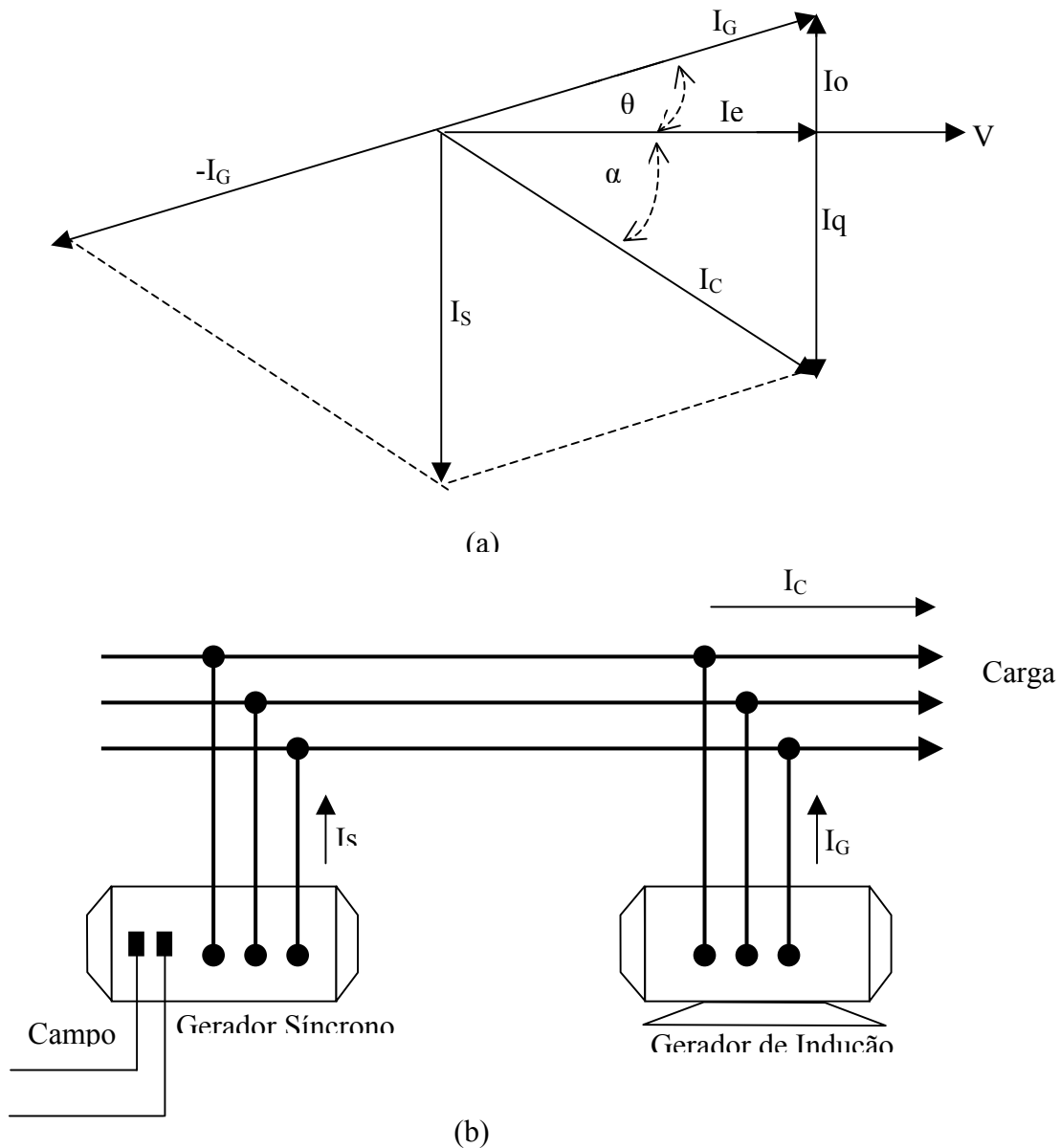


Figura 2 – Gerador síncrono em paralelo com gerador de indução

Teoricamente o gerador de indução poderia suprir sozinho a corrente de uma carga *capacitiva* de módulo igual a  $I_o$ . Mesmo assim, seria indispensável um máquina síncrona no sistema para assegurar um funcionamento satisfatório. A máquina assíncrona não possui uma velocidade definida para uma determinada frequência. Sua velocidade, com frequência uniforme, varia com a carga. Uma vez que a velocidade do motor de indução não se acha em sincronismo com a frequência da linha de alimentação, o gerador de indução pode ser ligado à linha logo que atinja 90% ou 95% da velocidade síncrona. Máquinas de potência superior a 500 kVA devem ser aceleradas até a 95% da velocidade síncrona antes de serem conectadas à rede da concessionária. Após a conexão, a máquina é acelerada até atingir uma velocidade superior à síncrona, quando então passa a funcionar como gerador de indução, geralmente com deslizamento negativo de 5%, liberando sua potência ativa nominal. Nos cálculos do desempenho da máquina de indução foi utilizado o circuito equivalente da figura 3.

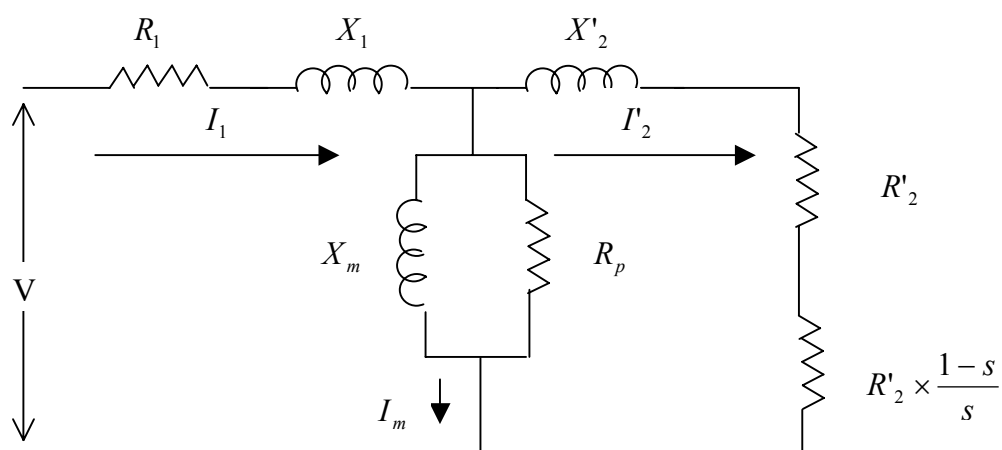


Figura 3 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução

Na figura 3 todos os parâmetros são referidos ao estator. A corrente do rotor é dada por:

$$I_2 = \frac{sE'_2}{R'_2 + \frac{1-s}{s}R'_2} \quad (1)$$

Onde  $I'_2$  é a corrente do rotor,  $E'_2$  é a fem do rotor,  $R'_2$  a resistência e  $X'_2$  a reatância, ambas do rotor referidas ao estator  $s$  é o deslizamento e  $j$  é a unidade imaginária.

Dividindo o numerador e o denominador da equação (1) pelo escorregamento a fem do rotor pode ser expressa na mesma frequência do estator, na equação (2) adiante, conforme o circuito equivalente da figura 3.

$$I_2 = \frac{E'_2}{\frac{R'_2}{s} + jX'_2} \quad (2)$$

Pode-se, agora, obter a corrente de partida do motor ao ser conectado à rede com o rotor a 90% da velocidade síncrona, por exemplo, fazendo no circuito equivalente a resistência do rotor igual à sua resistência com o rotor bloqueado, dividida pelo escorregamento a 90% da velocidade síncrona. A corrente de partida cairá muito rapidamente porque o motor, do instante da conexão até atingir a velocidade síncrona, absorverá potência mecânica de duas fontes, a saber: da turbina e da rede da concessionária. Todos os cálculos de desempenho da máquina assíncrona, funcionando como motor ou gerador, cujos resultados são mostrados nas tabelas do item 4 adiante, foram feitos com o aplicativo de fluxo de potência ADEPT-5.2, da Siemens.

### 3. REQUISITOS TÉCNICOS PARA A CONEXÃO DE GERADOR ASSÍNCRONO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO DA CEMIG

O documento<sup>4</sup>, baseado na Resolução<sup>1</sup>, trata de geradores de indução no item 7.3.49. As diretrizes<sup>4</sup>, no caso de PCH com máquina assíncrona recomendam limitar a 1 MW a potência do gerador que pode ser conectado à rede pública. Neste trabalho a potência limite será de 500 kW e só no caso em que a rede tiver alta capacidade de curto circuito no ponto de acesso ela poderá chegar a 1 MW.

Condições mais amplas constam do Decreto-Lei<sup>5</sup>, que, em linhas gerais, segue as recomendações da União Européia. Os procedimentos recomendados pelo governo de Portugal podem ser adotados no Brasil, ressalvadas pequenas diferenças das normas de distribuição.

Duas dessas diferenças entre as normas brasileiras e as disposições do Governo Português são destacadas a seguir:

- No Brasil o fator de potência mínimo a ser mantido pelo acessante é de 0,92, enquanto que em Portugal o valor mínimo exigido era de 0,85.
- Segundo as diretrizes da ELETROBRÁS, a potência máxima do gerador assíncrono cujo acesso é permitido à rede pública é de 1 MW. Em Portugal não se faz limitação de potência.

#### 4. ESTUDO DE UM CASO TÍPICO DE PCH COM GERADOR DE INDUÇÃO

As tabelas e figuras abaixo mostram as características e os resultados de desempenho de um gerador de indução e de um gerador síncrono, de mesma potência, conectados a um alimentador da rede de distribuição de média tensão, no nível de 15 kV. Na sequência, comparam-se os desempenhos das duas máquinas.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS GERADORES	
Potência nominal (MVA)	0,39
Potência gerada (MW)	0,35
Fator de Potência	0,9
Tensão nominal de geração (kV)	0,44
Tensão máxima de geração (pu)	1,05
Tensão mínima de geração (pu)	0,95

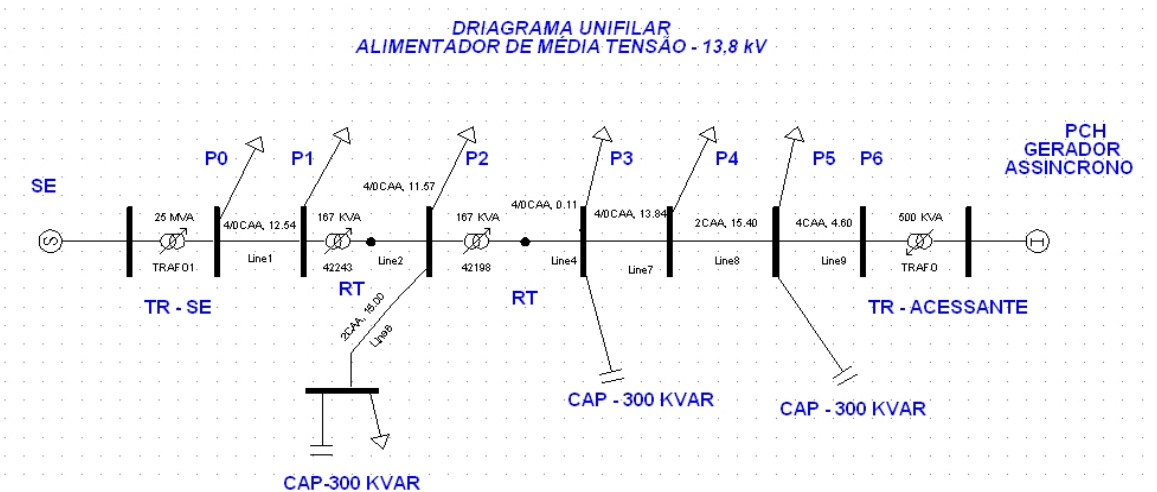


Figura 4 – Diagrama unifilar com o gerador conectado

Tabela 2 - Diagnóstico do sistema existente			
TRECHO	BITOLA	EXTENSÃO(km)	EQUIP. NO PONTO
P0 - P1	4/0 CAA	12,54	RT-42243
P1 - P2	4/0 CAA	11,17	RT-42198
P2 - P3	4/0 CAA	0,11	CAP- 300 KVAR
P3 - P4	1/0 CAA	13,84	
P4 - P5	2 CAA	15,40	CAP- 300 KVAR
P4 - P6	4 CAA	4,60	PCH

Tabela 3 - Tensões (p.u.)		
PONTO	C. LEVE	C. PESADA
P0	1,04	1,04
P1 a P3	1,05	1,05
P4	1,05	1,00
P5 e P6	1,05	0,96

Tabela 4 - Fluxo de Potência (kW / kVAr)				
TRECHO	CARGA LEVE		CARGA PESADA	
	kW	kVAr	kW	kvar
P0 - P1	708	-827	3359	768
P1 - P2	691	-850	3122	439
P2 - P3	349	-853	1579	11
P3 - P4	338	-848	1050	108
P4 - P5	299	-874	881	20
P5 - P6	136	76	296	87
P6	4	2	9	3

Tabela 5 - Perdas (kW)			
TRECHO	CARGA LEVE	MÉDIA	CARGA PESADA
TOTAL	110	151	425
	Perdas (kWh/dia)		
	880	2114	850
Perda Total (kWh/dia)	3844		



<b>Tabela 6 - Perdas (kW) com gerador síncrono</b>			
TRECHO	CARGA LEVE	MÉDIA	CARGA PESADA
TOTAL	102	101	331
	Perdas (kWh/dia)		
	810	1410	660
Perda Total (kWh/dia)	2880		

<b>Tabela 7 - Tensões (p.u.) com o gerador síncrono conectado</b>		
PONTO	LEVE	PESADA
P0	1,04	1,04
P1	1,05	1,04
P2 e P3	1,05	1,01
P4	1,05	1,00
P5	1,06	0,99
P6	1,07	0,97

<b>Tabela 8 - Tensões (p.u.) com o gerador de indução conectado</b>		
PONTO	LEVE	PESADA
P0	1,04	1,04
P1	1,05	1,04
P2 e P3	1,05	1,01
P4	1,05	1,00
P5	1,05	0,98
P6	1,05	0,96

<b>Tabela 9 - Fluxo de Potência com o gerador de indução conectado (kW / kVAr)</b>				
TRECHO	LEVE		PESADA	
	kW	kVAr	kW	kVAr
P0 - P1	491	-662	2972	876
P1 - P2	477	-681	2780	611
P2 - P3	147	-410	1243	205
P3 - P4	-2	-2	711	302
P4 - P5	-50	24	523	213
P5 - P6	-210	304	-12	316
P6	-350	227	-350	216

<b>Tabela 10 - Perdas (kW) com o gerador de indução conectado</b>			
TRECHO	LEVE	MÉDIA	PESADA
TOTAL	102	101	331
	<b>Perdas (kWh/dia)</b>		
	<b>816</b>	<b>1414</b>	<b>662</b>
Perda Total (kWh/dia)	<b>2892</b>		

<b>Tabela 11 - Quadro Comparativo – Diagnóstico inicial versus diagnóstico após a conexão</b>		
<b>Perdas (kWh) – Diagnóstico antes da conexão</b>		
Leve	Média	Pesada
880	2114	850
Total das perdas: 3844		
<b>Perdas (kWh) com a conexão do gerador assíncrono</b>		
Leve	Média	Pesada
816	1414	662
Total das perdas: 2892		
<b>Perdas (kWh) com a conexão do gerador síncrono</b>		
Leve	Média	Pesada
810	1410	660
Total das perdas: 2880		

Comparando as tabelas 3 e 8 vê-se que a entrada do gerador de indução melhorou ligeiramente o nível de tensão no ponto P5 durante o horário de carga pesada, que passou de 0,96 p.u. para 0,98 pu. após a conexão. Nos outros pontos não houve alteração no valor da tensão. Das tabelas 4 e 9 vê-se que diminuiu o fluxo de potência entre a fonte (SE da concessionária) e os consumidores, resultando em diminuição das perdas ativas totais, que caíram de 3844 kWh para 2892 kWh, conforme tabela 10. A tabela 7 mostra que houve pequena sobretensão no ponto P6, durante a carga leve, com a entrada do gerador síncrono. A tabela 11 mostra que as perdas com ambos os tipos de gerador são praticamente iguais.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O custo da PCH com máquina assíncrona, que não tem regulador de tensão e dispositivo de sincronização, é cerca de 80% menor do que o daquela com gerador síncrono. Os custos de manutenção e de operação são muito baixos. Portanto, a opção pelo gerador de indução poderá viabilizar o aproveitamento de pequenos potenciais hidrelétricos, quando o custo for o fator determinante para a implantação do projeto.

A partir das considerações aqui apresentadas, pode-se admitir a ligação de geradores assíncronos à rede de distribuição da CEMIG, com potência de até 500 kW, desde que sejam obedecidas as condições abaixo:

- O gerador só poderá ser conectado após atingir 95% de sua velocidade síncrona, acelerado pela máquina primária.
- O acessante, se necessário, deverá providenciar a instalação de capacitores para a compensação do reativo solicitado da rede pela máquina.
- Os capacitores instalados deverão ser ligados à rede elétrica 1 minuto após o gerador assíncrono entrar em funcionamento, por razão de segurança.
- Os capacitores instalados pelo acessante deverão ser desligados automaticamente quando houver falta de tensão da rede para evitar a auto excitação do gerador .
- O acessante deverá se comprometer a instalar dispositivo para inibir a injeção de harmônicos na rede da concessionária se o seu gerador for de construção que possa causar distorção harmônica na rede.
- A queda de tensão transitória na rede da CEMIG devido à ligação de geradores assíncronos não poderá ser superior a 5%.
- O regime de neutro do gerador assíncrono será o mesmo da rede da concessionária.
- O gerador de indução, não poderá funcionar como motor de indução, sem prévia autorização da CEMIG, como nos demais casos de liberação de carga. Para isso, deverá ser instalado relé de potência inversa, da mesma forma que nos casos de PCH com gerador síncrono.
- O acessante deverá instalar um transformador corretamente dimensionado para a conexão da máquina com a rede de média tensão da CEMIG

Observação: A recomendação da ELETROBRÁS, de limitar a potência do gerador assíncrono do acessante a 1 MW, visa reduzir os distúrbios da rede no instante da conexão. Mediante estudo específico, a potência do gerador assíncrono poderá superar o limite de 500 kW aqui adotado, quando a capacidade de curto circuito da rede no ponto de acesso for suficiente para minimizar esses distúrbios.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANEEL. Decreto 5.613/04, 30/07/2004.
2. DAWES, Chester. *Curso de Eletrotécnica – 2º volume*. Editora Globo. Porto Alegre, 1974.
3. DEL TORO, Vincent. *Máquinas Elétricas*. Editora LTC
4. ELETROBRÁS. Diretrizes Para Estudos e Projeto de Pequenas Centrais Hidroelétricas.
5. GOVERNO DE PORTUGAL. Decreto-Lei Nº 189/88, 27/05/1988.
6. GRAY, Alexander & WALLACE, G.A. *Princípios de Eletrotécnica*. Ao Livro Técnico S. A. Rio de Janeiro, 1967.
7. MARTINO, G. *Eletricidade Industrial*. Editora Hemus.
8. RISCHBIETER, Karl. *Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Fórum Técnico Alternativas Energéticas, Belo Horizonte, Outubro 2001