

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL CICLO DE ARRANQUES Y PARADAS EN EL ESTATOR DE GENERADORES SINCRONICOS

Renato Lélío da Silva Santos (AMAZONASENERGIA/ELETROBRÁS) renatolelio@bol.com.br

Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira (UFPA) limão@ufpa.br

M.Sc Jandecy Cabral Leite (ITEGAM) jandecy.cabral@itegam.org.br

M.Sc Manoel Socorro Santos Azevedo (ITEGAM) manoel.azevedo@itegam.org.br

Prof. M.Sc. Anderson Fernandes Esteves (ITEGAM) Anderson.esteves@itegam.org.br

Prof. M.Sc. Paulo Henrique de Lima Maciel (ITEGAM) Paulo.maciel@itegam.org.br

Resumen— Los generadores síncronicos se someten a diferentes situaciones de paradas para salida de servicio motivado en ocasiones por factores externos o actividades de mantenimiento planificadas. Las diferentes variaciones de temperatura a que se somete el generador síncronico, pueden afectar el aislamiento del estator. En el presente trabajo busca determinar una tendencia de progresión del envejecimiento del aislamiento de los enrollados estatóricos en máquinas que sufren repetitivos arranques y paradas y que quedan fuera de servicio por muchas horas. El estudio fue aplicado en los cinco generadores síncronicos de la hidroeléctrica de Balbina, perteneciente al grupo Eletrobrás, en la region de Amazonas, Brasil, este se realiza a partir de los ensayos de análisis de descargas parciales de los generadores síncronicos practicados periódicamente para diagnosticar problemas en sus enrollados estatóricos.

Palabras clave— **Diagnostico en maquinas rotatorias, descargas parciales.**

I. INTRODUCCIÓN

El sistema actual de generación de energía eléctrica, en condiciones de mercado competitivo, los productores de energía eléctrica están presionados a mantener los índices de disponibilidad en niveles elevados. La salida de servicio no planificada de unidades de generación y el aumento de los costos de mantenimiento son serios problemas que se presentan debido a la pérdida de confiabilidad producto del incremento de los índices de

fallas provocadas por diversos factores entre los cuales se pueden citarse deterioro de los aislamientos de los generadores debido a no haber desarrollado una adecuada estrategia de mantenimiento, deficientes estrategias de y operación etc. Varios investigadores y estudiosos en el área de grandes máquinas rotativas, descubrieron que en estos fallos, casi siempre aparecían síntomas de grandes descargas parciales, perjudicando bastante la salud de la máquina. Surgió a la necesidad de estudiar las descargas parciales que tienen lugar en los enrollados estatóricos de generadores síncronicos, que en la mayoría de las veces, preceden esos fallos eléctricos, los cuales son originados por diversos factores, de ellos es representativo la cantidad (ciclo) de arranques y paradas, que finalmente perjudican y reducen la vida útil de los generadores.

La contribución de este trabajo es comprobar estudios ya realizados con descargas parciales, a fin de mostrar y analizar una causa asociada a ese fenómeno y sacar conclusiones acerca del asunto propuesto que ya viene siendo estudiado por varios investigadores en el área de máquinas rotativas de alta tensión, y proponer una planificación de operación a fin de minimizar los arranques y paradas, proporcionando entonces, una mayor vida útil de las máquinas.

II. METODOLOGIA

La investigacion es aplicable a cualquier planta de generación hidroeléctrica, pero específicamente fue realizada en las unidades generadores hidráulicas (UGHs) de la hidroeléctrica de Balbina, localizada en el estado de Amazonas, que esta dotada de cinco unidades generadoras con capacidad total de generación de 250 MW.

Fueron instalados [sensores](#), precisamente dos pares de [capacitores](#) en las tres fases de cada unidad [generadora](#) hidráulica, totalizando tres pares para mediciones de parámetros como descargas parciales.

Todos los parámetros medidos para realización del estudio son:

- Descargas Parciales de los enrollamientos en cada fase del [estator](#);
- Temperatura del enrollamiento y del núcleo del [estator](#);
- Potencia generada de cada [hidrogenerador](#);
- Análisis del tiempo que cada [hidrogenerador](#) quedó desconectado. Conteo de arranques y paradas.

Para la [realización](#) de los análisis fueron utilizados los instrumentos [PDA \(Analizadores de descargas parciales\)](#), el [PDA-IV](#) y el [PDA-H](#). Los primeros análisis fueron realizados por el [PDA-H](#), instrumento [producido por empresa](#) canadiense, que trabaja en una plataforma del MS-DOS, en el sistema operacional Windows 95. El [PDA-IV](#), [producido](#) por la empresa [IRIS POWER](#) (empresa canadiense) es utilizado actualmente en los ensayos de análisis de descargas parciales en la hidroeléctrica de [Balbina](#), adquirido en el año de 2010.

Se realiza un balance histórico de los resultados de [monitoreo](#) del grado de deterioro de los aislamientos a través del diagnóstico con los instrumentos que miden descargas parciales el periodo 2005-2008.

Para este período se analizan los [datos](#) de comportamiento para obtener el histórico de cada [hidrogenerador](#) en fun. En el período entre enero y septiembre de 2010 fueron monitoreadas las unidades a través del ícicon de las horas en las que las máquinas estuvieron paradas instrumento [PDA-IV](#). Del sumario [Qm](#) (número de máxima amplitud) y a través del informe de indicadores de desempeños [TEIF](#) (Tasa equivalente de indisponibilidad forzada) e [IP](#) (Índice de disponibilidad programada en el año) de las [cinco](#) máquinas se verificará la [tendencia](#) del deterioro en los [estatores](#) de las cinco máquinas y mostrará un resultado del estudio.

Las pruebas con el [PDA](#) pueden ser realizadas en las siguientes etapas:

- [FLH](#) – [Prueba](#) con carga en caliente;
- [NLH](#) – [Prueba](#) sin carga en caliente;
- [NLC](#) – [Prueba](#) sin carga en frío.
- [FLC](#) – [Prueba](#) con carga en frío

Para los ensayos del estudio de [caso](#) de serán utilizadas [las pruebas FLH](#).

1) Relación pulsos positivos, pruebas [FLH](#) y [NLH](#) – Para mismas condiciones de potencia (+/- 10%) y temperatura (Variación de 5°C):

[La curva](#) de pulsos positivos ([FLH](#)) se aleja de la [curva](#) de pulsos positivos ([NLH](#)) en el sentido creciente de magnitud de [DP \(mV\)](#) – significa indicación de estado inicial disminución de la [firmeza](#) de las cuñas de fijación del enrollado.

2) Relación [de pulsos](#) positivos y negativos – [Prueba FLH](#)

a) [Curva de pulsos](#) negativos prevaleciendo sobre la [curva](#) de [positivos](#): Significa que la descarga parcial predominante está localizada en la [interface cobre-aislamiento](#);

b) [Curva](#) de [pulsos](#) positivos prevaleciendo sobre la [curva](#) de [pulsos](#) negativos: Significa que la descarga parcial predominante está localizada en el interior de la ranura, barra para núcleo.

c) [Curva](#) de [pulsos](#) negativos [sobreponiéndose](#) sobre la [curva](#) de [pulsos](#) positivos, o sea, no hay predominio de ninguna de las [curvas](#): Significa que la descarga parcial predominante está localizada en el interior del [aislamiento](#) de la barra.

Cuando [la curva](#) toma en forma de una “rodilla” sugiere que la descarga parcial predominante se localiza en la región del enrollado (cabezas de bobinas)

III. ESTUDIO DE CASO.

[La](#) hidroeléctrica de [Balbina](#) está localizada en el municipio de Presidente Figueiredo, en el estado de Amazonas, a 180 km de la ciudad de Manaus, en el río [Uatumã](#), afluente del río Amazonas. [Posee](#) capacidad de generación de 250 MW de energía eléctrica, contando con 5 generadores 50MW cada uno. Los generadores son del tipo [Umbrella](#) de baja rotación (105,88 rpm), capacidad nominal de 55,5 [MVA](#) y tensión nominal de 13,8 [kV](#),

Las unidades generadoras 1,3 5 son auto-alimentadas, o sea, [parte](#) de la energía generada por ellas es utilizada para suministrar la corriente de excitación del [estator](#) y alimentar las bombas y demás equipos eléctricos necesarios al funcionamiento de la unidad. Los generadores 2 y 4 poseen alimentación [externa](#). Por tanto, en operación normal, por lo menos uno de los generadores de número [impar debe](#) estar

siempre en operación, por eso, hay una ocurrencia mayor de generadores pares tienen frecuentes arranques y paradas y consiguientemente, con un [gran](#) número de horas con reserva de energía [desconectada](#).

Ensayos con PDA-H.

Fueron [recopilados](#) los resultados [registrados](#) de los ensayos semestrales de magnitudes de descargas parciales con el PDA-H durante el período de diciembre de 2005 a agosto de 2008. En ese instrumento, [la](#) variable conocida es [llamada](#) [NQN](#), que es el número de cantidad normalizada en [milivolt](#) (mV). Una vez que la condición de un [estator](#) en particular fuese conocida, sería suficiente [lograr](#) [la](#) [tendencia de comportamiento](#) de las alteraciones de los valores [NQN](#) de modo que pueda detectarse la aparición de nuevos problemas o el incremento de los ya existentes. Los ensayos son extraídos en cada fase del [estator](#), donde hay colocados dos sensores.

Resultados por unidades generadoras tomados con el PDA-H.

La Tabla 3.1 muestra los resultados de las mediciones que fueron realizadas durante los ensayos de descargas parciales indicadas por P+ ([pulsos](#) positivos) y P- ([pulsos](#) negativos), en periodos cada seis meses, de diciembre de 2005 a agosto de 2008 en las unidades generadoras [La](#) sigla de los [sensores](#) de cada medición significa el número del generador (G1), [la](#) indicación de la fase (A) y [la](#) indicación del número del [sensor](#) (C1).

A continuación se muestra el regimen de trabajo de los generadores en el período de estudio donde se aprecia la cantidad de horas fuera de servicio, en el [horario](#) de mayor carga de 13:00 a las 16:00 y de las 19:00 a las 23:00. Estos datos son [registrados](#) por los operadores de la hidroeléctrica de [Balbina](#) (Tablas 3.2-3.5).

En el período correspondiente al año 2008, el alto volumen de las precipitaciones hizo que los niveles de los embalses se mantuvieran elevados y para evitar daños en la infraestructura de las instalaciones.

	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jul/08	2 h	49 h	0 h	65 h	0 h
ag/08	0 h	16 h	0 h	22 h	0 h
se/08	0 h	0,5 h	0 h	0 h	0 h
oc/08	4 h	0 h	0 h	0 h	0 h
no/08	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h
de/08	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h

Tabla 3.5 Tiempos de parada 2008

Acopl.	Dez/05		jul/06		dez/06		jul/07		jan/08		ago/08	
	P+ (mV)	P- (mV)	P+ (mV)	P- (mV)	P+ (mV)	P- (mV)	P+ (mV)	P- (mV)	P+ (mV)	P- (mV)	P+ (mV)	P- (mV)
G1AC1	128	128	134	125	75	125	77	125	81	182	128	29
G1AC2	78	77	80	78	54	64	66	63	66	68	22	24
G1BC1	64	66	54	61	53	60	60	60	51	48	22	38
G1BC2	142	78	141	132	125	174	126	123	131	124	121	117
G1VC1	135	150	180	202	187	146	142	150	190	150	151	150
G1VC2	128	69	107	42	27	25	27	57	48	48	49	36
G2AC1	195	220	317	651	220	295	187	255	204	207	218	211
G2AC2	146	212	238	745	162	305	86	276	222	227	150	195
G2BC1	218	219	665	665	167	373	162	345	169	171	233	302
G2BC2	151	152	245	464	175	173	157	149	164	169	162	162
G2VC1	273	221	460	509	311	247	295	230	315	246	306	162
G2VC2	235	234	373	391	171	173	229	163	242	177	239	171
G3AC1	126	133	123	177	132	125	135	125	126	124	75	76
G3AC2	200	151	194	192	199	388	312	284	349	291	218	210
G3BC1	157	227	148	150	148	148	150	164	162	237	139	215
G3BC2	159	157	142	142	140	140	81	185	134	132	117	110
G3VC1	220	157	157	159	157	157	160	225	169	239	160	167
G3VC2	309	229	244	200	247	238	318	482	334	340	315	255
G4AC1	69	61	37	60	115	130	108	120	107	110	72	76
G4AC2	229	226	210	150	224	220	224	220	205	222	162	157
G4BC1	157	199	186	172	212	199	220	209	270	200	152	207
G4BC2	207	220	177	175	220	226	189	209	244	190	196	196
G4VC1	205	209	185	190	142	149	135	142	187	142	177	151
G4VC2	357	268	244	234	284	312	282	270	199	255	200	205
G5AC1	108	54	80	87	37	60	27	54	37	64	27	55
G5AC2	15	37	54	82	5	48	11	10	27	64	26	27
G5BC1	64	78	34	70	37	65	27	54	60	66	51	60
G5BC2	15	92	34	27	54	26	36	11	36	5	38	26
G5VC1	57	55	47	54	60	48	37	36	47	36	35	36
G5VC2	47	27	5	11	10	10	10	11	5	5	5	5

	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jul/05	0 h	8h	0h	9,5h	0h
ag/05	44h	4h	4h	6h	0h
se/05	1 h	13h	1h	21h	0h
oc/05	1h	18h	0h	37h	0h
no/05	1,5 h	46h	20h	20h	0,5h
de/05	19 h	39,5h	0h	0h	0h

Tabla 3.1 Mediciones con PDA-H

	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jul/06	0 h	12 h	0 h	17 h	0 h
ag/06	0 h	29 h	0 h	22 h	0 h
se/06	0 h	37 h	2 h	22 h	0 h
oc/06	8 h	126 h	19 h	70 h	0 h
no/06	116 h	84 h	0 h	30 h	0 h
de/06	0 h	4 h	0 h	6 h	3 h

Tabla 3.2 Tiempos de parada 2005

	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jul/07	0 h	32 h	41 h	47 h	4 h
ag/07	0 h	25 h	11 h	35 h	0 h
se/07	3 h	66 h	98 h	92 h	3 h
oc/07	3 h	98 h	58 h	95 h	0 h
no/07	0 h	75 h	7 h		0 h
de/07	1 h	85 h	0 h	46 h	0 h

Tabla 3.3 Tiempos de parada 2006

Tabla 3.4 Tiempos de parada 2007

Ensayos con PDA-IV

Fueron [obtenidas las](#) magnitudes de descargas parciales con el PDA-IV. En ese instrumento, [la](#) variable conocida es [Qm](#), que es el número de máxima amplitud, y [la](#) unidad es en [milivolts \(mV\)](#).

UGH'S	FASES	março/junho/2010	
		Pulsos + (mV)	Pulsos - (mV)
BAUGH-01	FASE A	40	74
	FASE B	43	82
	FASE V	41	78
BAUGH-02	FASE A	106	97
	FASE B	96	98
	FASE V	97	74
BAUGH-03	FASE A	113	98
	FASE B	82	87
	FASE V	136	123
BAUGH-04	FASE A	93	93
	FASE B	97	140
	FASE V	96	99
BAUGH-05	FASE A	76	92
	FASE B	59	86
	FASE V	53	84

Tabla 3.6 - Resultados de la UGH-01 a UGH-5 con PDA-IV

[Durante este período el tiempo de operacion de las diferentes unidades se muestra em la tabla 3.7](#)

Meses	BAUGH01	BAUGH02	BAUGH03	BAUGH04	BAUGH05
jan/10	739,1 h	305,38 h	473,05 h	287,8 h	744 h
fev/10	666,48 h	209,89 h	392,31 h	179,99 h	672 h
mar/10	744 h	249,46 h	368,39 h	136,66 h	716,08 h
abr/10	720 h	161,04 h	314,93 h	121,3 h	720 h
mai/10	741 h	123,72 h	277,75 h	142,53 h	744 h
jun/10	637,2 h	118,92 h	425,3 h	113,4 h	720 h
jul/10	738,73 h	86,08 h	473,62 h	203,7 h	521,53 h
ago/10	741,45 h	327,05 h	431,1 h	320,8 h	744 h
set/10	614,1 h	380,67 h	594,17 h	401,92 h	714,35 h

Tabla 3.7 – Tiempo de operacion de las unidades.

Obviamente, por el hecho de las unidades generadoras hidráulicas 2 y 4 no alimenten los equipos de servicios auxiliares como [motobombas](#) y otros equipos eléctricos, presentaron menos horas de operación para producción de energía.

IV - DISCUSIONES DE LOS RESULTADOS

Según resultados encontrados en el período de 2005 a 2008, referentes al histórico de horas paradas de las

unidades generadores 1 a 5 y de los resultados de las magnitudes de los ensayos de descargas parciales, [NQN](#), se verificó la tendencia esperada. Los resultados de las unidades generadores 2 y 4 de los ensayos de descargas parciales tuvieron magnitudes mayores con relación las otras unidades generadores hidráulicas, debido a presenten una cantidad mayor de horas con reserva de energía [desconectada](#). Se verificó como las unidades generadoras [impares](#) 1, 3 y 5, [esenciales en la](#) alimentación de los servicios auxiliares, como [motobombas](#) y otros equipos eléctricos, trabajan de forma alterna y por lo general la unidad número 5 trabajó en régimen [continuado](#) y solamente paró en caso de emergencia, como para limpieza de radiadores, limpieza de [anillo colector](#) y otros. Se constató semejanzas en los resultados de las magnitudes de descargas parciales de las máquinas 1 y 3, la máquina 3 presentó resultados un poco más acentuados con relación la unidad 1 y equivalentes a los de [la](#) unidad [generadora](#) 4.

Como la unidad [geradora](#) número 5 presentó una incidencia baja en horas de máquina parada, se constató la tendencia de que los bajos valores de descargas parciales en el [estator](#), están relacionados con el mayor régimen de operación, debido al menor número de arranques y paradas. Una observación a ser realizada, es que en el período del 2008, las mediciones realizadas en agosto, muestran una estabilización en las magnitudes de las medidas de los pulsos [de](#) descargas, debido a que todas las máquinas trabajaron prácticamente en régimen [continuo](#), a causa de la necesidad de equilibrar el nivel del embalse que estaba muy arriba en la época de la lluvia.

En el período de 2005 a 2008, las unidades generadoras hidráulicas que presentaron mayor número de arranques y paradas y menos horas de operación [lograron](#) resultados más acentuados con relación a la magnitud de las descargas parciales.

Por tanto, queda demostrado que las grandes máquinas rotativas [deben](#) ser programadas para que operen en régimen [continuado](#), y solamente paren para un [mantenimiento](#) de preferencia programada, a fin de evitar que la máquina tenga un desgaste en [su parte](#) eléctrica y evitando [mantenimientos](#) innecesarios y aumentando [su](#) vida útil.

CONCLUSIONES

Las descargas parciales constituyen una valiosa herramienta para el diagnostico de las grandes maquinas rotatórias lo cual permite evitar roturas innecesarias y acortamiento de su vida útil. El excesivo regimen de arranques y paradas de este tipo de maquinas acelera el deterioro de las mismas, lo cual a quedado demostrado a partir de los resultados obtenidos em esta investigacion.

Debe existir una adecuada planificación de operación y [mantenimiento](#), para evitar constantes arranques y paradas de los generadores.

Los generadores [síncronos](#) no [deben](#) presentar [continuos](#) arranques y paradas para que no afecte el [aislamiento](#) de [sus](#) enrollados [estatóricos](#) y así no comprometan [su](#) vida útil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCE E. , A. S. (1999). *Um modelo de otimização de despacho de máquinas em usinas hidrelétricas*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

EDIN, H. *Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage*. Stockholm-Sweden, 2001. PhD Thesis in Electrical Engineering, Kungl Tekniska Hogskolan.

EPE. (2008). Empresa de Pesquisa Energética,(2008). NOTA TÉCNICA DEN 03/08: *Considerações sobre Repotenciação e Modernização e Usinas Hidrelétricas*, Rio De Janeiro, Brasil.

NILSSON, O. & SJELVGREN, D. *Variable splitting applied to modeling of start-up costs in short term hydro generation scheduling*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 2, pp.38-43, May 1997(b).

POLUX Tecnologia em Equipamentos S.A., 2010. Apostila do Curso Monitoramento em Descargas Parciais V. 3.0.

PROVENÇANO, F. (2003). *Despacho Econômico em Usinas Hidrelétricas*. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil.

SILVA, J. J, Gennari, M. C., “*Diagnóstico Elétrico de Máquinas Elétricas Rotativas*”, In: *II ENAM – Encontro Nacional de Máquinas Rotativas*, Foz do Iguaçu, Brasil, Nov 2004.

IRIS POWER LP, “*Iris Seminar – Levels 1 and 2 – Student Handbook*”, version 1.0, January,2007.

KREUGER, F. H. *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. 1.ed. London: Butterworths, 1989.

SILVA, G. C. (2005). *Descargas Parciais Estimuladas Por Raios-X Contínuo E Pulsado Em Materiais Dielétricos: Similaridades E Diferenças*. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná.

SILVA, J. J, Gennari, M. C., “*Diagnóstico Elétrico de Máquinas Elétricas Rotativas*”, In: *II ENAM – Encontro Nacional de Máquinas Rotativas*, Foz do Iguaçu, Brasil, Nov 2004.