



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Retrofit de las protecciones de los Centros de Control de Motores del Sistema de Ventilación de la Central Hidroeléctrica de ITAIPU

Julio Cesar Romero Ayala

ITAIPU BINACIONAL

Paraguay

Douglas Luiz Vincenzi Ostroki

ITAIPU BINACIONAL

Brasil

RESUMEN

Los Centros de Control de Motores del sistema de ventilación de la Casa de Máquinas de la Central Hidroeléctrica de ITAIPU cuentan en total con 674 motores de inducción desde 0,5CV hasta 50CV de potencia, siendo ellos moto-ventiladores y moto-bombas. Cada unidad generadora de la Central cuenta con estos tableros, teniéndose 546 de éstos en este sistema que son mantenidos periódicamente. Estos tableros están en operación a más de 30 años y el reflejo de esto se percibe en componentes ya están obsoletos y con final de su vida útil.

A través del análisis de la ingeniería de mantenimiento se decidió realizar el *retrofit* y mantenimientos predictivos en estos tableros, con la finalidad de extender la vida útil de sus componentes, de tal manera a garantizar la confiabilidad de los mismos hasta que se concrete la actualización tecnológica en la Central Hidroeléctrica prevista para los próximos años.

PALABRAS CLAVES

Servicios Auxiliares, ventilación, CCM, obsolescencia, retrofit, coordinación de protecciones, confiabilidad, optimización, mantenimiento predictivo.

1. INTRODUCCIÓN

La Central Hidroeléctrica de ITAIPU (CHI) es una entidad binacional, que tiene como meta generar energía eléctrica de calidad, con responsabilidad social y ambiental, impulsando el desarrollo económico, turístico y tecnológico, sustentable, en el Paraguay y en el Brasil. En el año 2015 la ITAIPU tuvo una participación en el suministro de energía eléctrica a 15% del Brasil y 75% del Paraguay. La CHI cuenta con 10 unidades generadoras en 50Hz y otras 10 unidades en 60Hz, con una potencia total instalada de 14.000 MW. El sistema de ventilación de la CHI a ser analizado en este trabajo técnico tuvo su inicio de operación en consonancia con las primeras unidades generadoras, siendo por tanto el tiempo un factor relevante, ya que son más de 30 años de servicio.

El sistema de ventilación de la Casa de Maquinas de la CHI está compuesto por 546 tableros que son los Centros de Control de Motores (CCM), y por tanto, los responsables de la protección eléctrica en 460Vca a 674 motores de inducción de 0,5CV a 50CV de potencia, siendo estos motores eléctricos tanto moto-ventiladores como moto-bombas. Cada una de las 20 unidades generadoras de la CHI cuenta con estos CCM que además son responsables de la ventilación forzada de otras áreas adyacentes dentro de la Casa de Máquinas.

La función requerida de este sistema de ventilación es de mantener en condiciones adecuadas la temperatura a través de la ventilación forzada a equipos asociados a la generación de energía eléctrica dentro de la Casa de Máquinas, pero debido a que este sistema opera en forma continua todo el año, refrigerando inclusive a los cubículos de los transformadores elevadores, fueron detectados consecuencias directas por deterioro, obsolescencia y final de vida útil de ciertos componentes, los cuales incrementaron de manera importante los mantenimientos aperiódicos en este sistema. A raíz de la tendencia detectada y a la importancia que este sistema tiene para mantener los altos índices de producción de energía eléctrica, surgió la necesidad de realizar un estudio acabado y ver la necesidad real de sustitución de ciertos componentes para poder extender la vida útil del sistema, aumentar su confiabilidad y disminuir las horas hombre requeridos en los mantenimientos aperiódicos.

Este estudio derivó en el análisis del estado actual de los mantenimientos periódicos y aperiódicos en el sistema de ventilación de la CHI, teniéndose que verificar más de 800 equipos catastrados y distribuidos en la Casa de Máquinas. Los mismos son clasificados en varios sistemas que son identificados por letras alfabéticas: A, B, C, D, E, F, G, I, J, K, L, M, O, P, Q, R, S, T, U y V. Los tableros que fueron analizados en este estudio fueron los KG y KH que están situados en los ejes A-B y C-D de la Casa de Máquinas, elevaciones 135, 132 y 122 respectivamente. También fueron analizados los sub-tableros GMV que están localizados próximos a los moto-ventiladores denominados por las letras VVT y están distribuidos en varias elevaciones a lo largo y ancho de toda la Casa de Máquinas. La tabla siguiente muestra la cantidad de tableros y sub-tableros existentes en los ejes A-B y C-D.

Tabla I. Cantidad total de tableros en el sistema de ventilación

Tableros	Cantidad existente		Sumatoria
	Eje A-B (Aguas arriba)	Eje C-D (Aguas abajo)	
KG	20	26	46
KH	20	40	60
GMV	204	236	440
Sumatoria	244	302	546

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Los motores que son alimentados en 460Vca por estos tableros son de variada potencia y requieren ajustes específicos de sus protecciones, lo que justificó la necesidad de contar con disyuntores especiales con características similares para poder estandarizar y simplificar los mantenimientos. A seguir en el gráfico 1, podrá apreciarse los motores del sistema de ventilación distribuidos por cantidad y con potencia máxima de hasta 15CV, los cuales están protegidos eléctricamente desde el proyecto original por disyuntores-contactores, modelo *integral 32* de la marca *Telemecanique*. Éstos serán denominados desde adelante en este trabajo técnico solo como *integrales*.

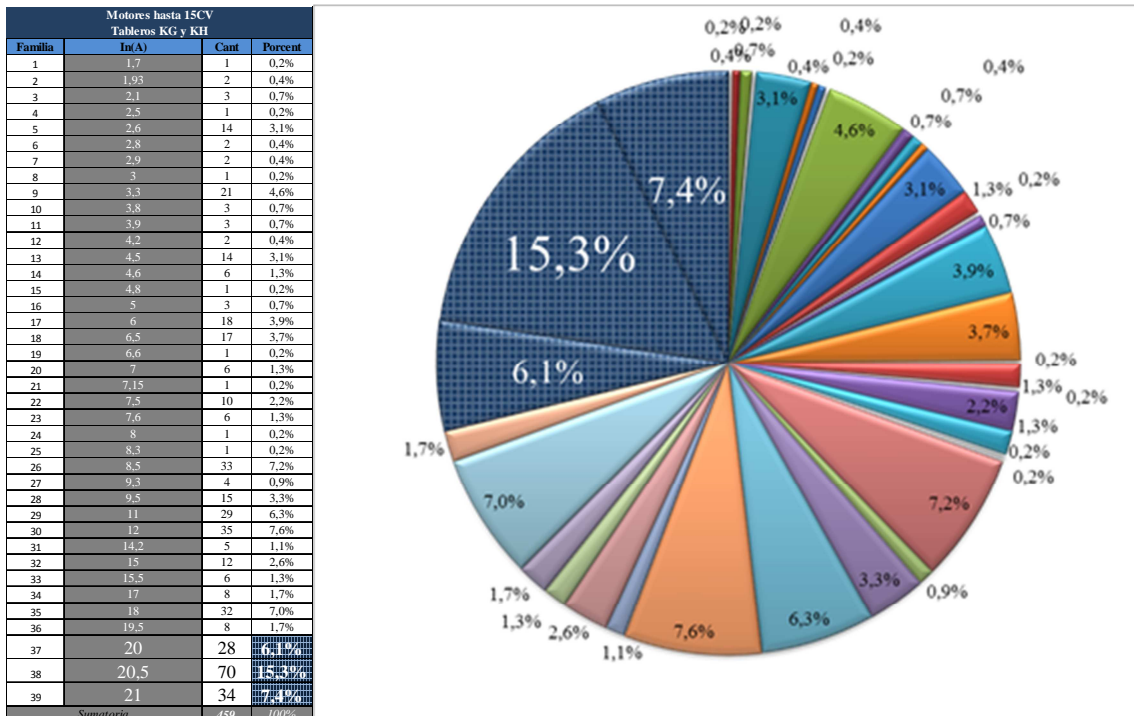


Gráfico 1. Clasificación de motores en los tableros KG y KH. Los motores entre 20 y 21A (~ 15CV) corresponden al 28,8% del total .

1.1 Objetivo general

Este trabajo técnico se enfoca en los estudios realizados en la verificación de los mantenimientos periódicos y aperiódicos ejecutados en el sistema de ventilación de la Casa de Máquinas de la CHI y el análisis de fallas y defectos de los últimos años en motores, disyuntores, relés y demás componentes distribuidos en los tableros KG, KH y GMV. El resultado de estas acciones derivó en el *retrofit* de estos tableros, con el objetivo de aumentar la confiabilidad del sistema de ventilación, optimizar las intervenciones de mantenimientos periódicos y disminuir las intervenciones de mantenimientos aperiódicos. Además, elaborar un plan de mantenimiento predictivo para determinar cuáles son las condiciones actuales de todos los componentes de los tableros de la ventilación, moto-ventiladores y moto-bombas en servicio, dejando el sistema en condiciones satisfactorias hasta que sea concretizada la actualización tecnológica de la CHI prevista para los próximos años. El cronograma de trabajos de este *retrofit* está previsto finalizar antes de año 2020.



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

1.2 Objetivos específicos

Levantamiento del histórico de trabajos de mantenimiento aperiódico en equipos asociados al sistema de ventilación para determinar la cantidad de horas hombres requeridas por los grupos de trabajos de la ejecución de estos servicios, en la solución de fallas y defectos en este sistema, además, identificar cuáles son los componentes involucrados en estas anomalías y determinar su impacto desde el punto de vista de la confiabilidad. Estas informaciones serán de utilidad para cuantificar la magnitud de los efectos del envejecimiento en equipos y componentes del sistema, y clasificar los mismos en función a su influencia en la disponibilidad del sistema estudiado.

Fueron analizados en este estudio, todos los diseños eléctricos de las protecciones de cables y motores de los CCM en 460Vca, para determinar la factibilidad de reemplazo de sus componentes por otros más actuales o con características más acordes a las necesidades presentes y requeridas a mediano plazo, previo a la actualización tecnológica prevista para los próximos años en los Servicios Auxiliares de la CHI. El objetivo de estas acciones consistió en optimizar las intervenciones de mantenimientos periódicos y disminuir las intervenciones de mantenimientos aperiódicos por parte de los grupos de trabajo de la eléctrica, ellos responsables en mantener el sistema de ventilación. Además, se pretende elaborar un plan de mantenimiento predictivo para poder determinar cuáles son las condiciones actuales de los componentes de los tableros de la ventilación, de los moto-ventiladores y moto-bombas.

2. METODOLOGIA

Para la obtención del histórico de los trabajos aperiódicos se utilizó la base de datos del Sistema de Mantenimiento Aperiódico (SMA), el cual cuenta con un registro de todas las actividades de los servicios aperiódicos de la Superintendencia de Mantenimiento de la ITAIPU. Este sistema hace parte del Sistema de Operación y Mantenimiento (SOM), el cual agrupa varios sistemas y subsistemas informáticos que fueron desarrollados internamente por la propia ITAIPU para ser utilizados por la dirección técnica. Estos datos obtenidos del SMA fueron repasados a planillas electrónicas para ser clasificados caso por caso y posibilitar un estudio minucioso de las ocurrencias que afectaron las actividades del sector MEG2 de la división eléctrica de equipos de generación SMMG.DT durante los últimos años.

Las verificaciones de los equipos y componentes eléctricos instalados actualmente en el sistema de ventilación de la Casa de Máquinas fueron realizadas en base a chequeos en campo y corroboradas posteriormente en escritorio con auxilio de informaciones disponibles en el SOM. Las consultas a los diseños eléctricos fueron realizadas utilizando el Sistema de Archivo Técnico (SAT), el cual consiste en un sistema que contiene toda la base de datos de los diseños técnicos y están disponibles para consultas mediante red interna de la ITAIPU. Estos diseños fueron analizados para obtener las informaciones necesarias de los proyectistas, fabricantes y proveedores de los materiales del sistema estudiado, y consecuentemente ver la necesidad y factibilidad de realizar modificaciones en los tableros KG, KH y GMV. En este contexto se destaca que cualquier modificación que implique mejoras en equipos o sistemas catastrados en el SOM es de atribución de las divisiones del departamento de ingeniería de mantenimiento SMI.DT dependiente de la Superintendencia de Mantenimiento SM.DT, que en este caso específico del *retrofit* en los Servicios Auxiliares corresponde al sector IEQ2 de la ingeniería de mantenimiento eléctrico SMIE.DT.

2.1 Retrofit

El sistema de ventilación en la situación encontrada en este estudio, requería indudablemente de ciertas mejoras, ya que su confiabilidad estaba comprometida por fallas y defectos encontrados en ciertos componentes de los tableros analizados, los cuales de alguna manera u otra incidían en las funciones requeridas del sistema. Por tanto fue necesario realizar un levantamiento de todas las ocurrencias que

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

afectaban directamente a los trabajos del sector MEG2, con la finalidad de minimizar las horas hombres en servicios aperiódicos.

Como solución a lo expuesto, se dio inicio a las mejorías en el sistema de ventilación, el cual consistía en realizar una renovación de todo el sistema con la incorporación de componentes con tecnología de vanguardia, más modernos y eficaces, o sea, realizar lo que se conoce a nivel industrial con el término de “*retrofit*”, a todos los tableros KG, KH y GMV de la Casa de Máquinas de la CHI.

2.1.1 Sustitución de lámparas, relés y disyuntores

Como parte de este *retrofit* se puede citar la sustitución de 5.800 lámparas incandescentes por lámparas de tecnología led en los anunciadores de los tableros KG y KH. También fueron sustituidas 2.200 lámparas incandescentes rojas y verdes por lámparas tipo led, correspondientes a los señalizadores de estos mismos tableros. Las lámparas tipo led instaladas tienen la ventaja de tener mayor durabilidad comparando con lámparas incandescentes, mayor a 10 veces, y también tener un menor consumo de energía. Las sustituciones de estas lámparas fueron necesarias debido a la gran cantidad de lámparas incandescentes que eran encontradas quemadas y que requerían frecuente reemplazos por parte de la MEG2.

Con respecto a los defectos en el sistema, se puede citar las procedentes de los relés de subtensión modelo 27A, marca Ward, los cuales deberían ser sustituidos por otro similar para todos los tableros KG y KH, ya que éstas estaban con defectos y ya no eran posibles ser reparados por la ITAIPU y además, ya estaban obsoletos y discontinuados comercialmente. Fue por tanto proyectada por la SMIE.DT las modificaciones necesarias en los diseños eléctricos e instalado satisfactoriamente un prototipo, utilizando relés de la marca Finder, los cuales contaban con codificación de stock y estaban disponibles en los almacenes de la CHI. Además estos relés ya eran utilizados en otros tableros de la Casa de Máquinas y estaban con su confiabilidad comprobada.

Otros de los defectos que se pueden mencionar fueron los encontrados en los disyuntores de protección de los transformadores de comando, 460/120Vca y 2KVA, instalados también en todos los tableros KG y KH. Fue por tanto requerido para esta situación, la compra de un disyuntor especial para protección de transformadores, el cual sería adquirido mediante especificación técnica e instalado como prototipo. Este trabajo necesitó de proyectos con modificaciones eléctricas y fue instalado satisfactoriamente por la ejecución, ya el disyuntor especificado contaba con características apropiadas para este tipo de carga, el cual no disparaba indebidamente con la corriente de magnetización “*irrush*” del transformador [1]. Para este *retrofit* fue utilizado disyuntor modelo 3RV14 serie sirius de la Siemens y posterior a la etapa de prueba, fueron adquiridos más disyuntores de este tipo para que sean sustituidos paulatinamente y de forma programada en las intervenciones de mantenimiento periódico de los tableros KG y KH, o de forma aperiódica caso haya sido necesario.

2.1.2 Sustitución de disyuntores-contactores (*integrales*)

Las sustituciones de las lámparas, relés y disyuntores especiales mencionadas más arriba son parte del *retrofit*, objetivo de este trabajo, pero el punto más crítico que tuvo que ser abordado en este estudio fue encontrar un modelo de disyuntor que sustituya al disyuntor *integral*, cuya cantidad instalada supera las 1.000 unidades en todo el sistema y estaban presentando frecuentes defectos y de forma creciente en los últimos años, y que en la mayoría de los casos ya no eran posibles de ser reparados. Estos defectos en los *integrales* derivaban en fallas en la ventilación, ya que dejaban indisponibles por cierto periodo de tiempo a moto-ventiladores y moto-bombas del sistema. Por un periodo de tiempo esta dificultad fue salvada con la utilización de los sobresalientes encontrados en los almacenes de la CHI y posteriormente, utilizando los *integrales* de los compartimientos reservas de tableros KG y KH. Estos disyuntores mencionados están

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

presentes en todos los tableros KG, KH y GMV, tanto de las instalaciones de aguas arriba como de aguas abajo de la Casa de Maquinas.

A través de verificaciones de los *integrales* con defectos se pudo constatar que estos disyuntores ya estaban en final de su vida útil, obsoletos y discontinuados comercialmente, por lo que era urgente encontrar un sustituto para generar sobresalientes.

Para encontrarlo fue necesario realizar una investigación dentro del abanico de disyuntores trifásicos de baja tensión disponibles actualmente en el mercado, con análisis de las características técnicas requeridas mediante estudio de las corrientes de corto circuito de cada tablero y la ayuda de modelados computacionales para poder elegir la mejor alternativa para proteger cables de fuerza y motores del sistema. Debido a que los nuevos disyuntores deberían soportar niveles de corto circuito importantes y además ser suficientemente flexibles para atender a los más variados rangos de corrientes nominales de los motores, fueron requeridas comparaciones entre modelos con ayuda de herramientas informáticas tales como, planillas electrónicas, software de fabricantes y herramientas de ingeniería asistida para el análisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia industriales.

A seguir serán expuestos los estudios eléctricos realizados y que fueron determinantes para concluir que los disyuntores *integrales* deberían ser sustituidos por un tipo de disyuntor industrial denominado comercialmente como *guardamotor*. Todos los estudios demostrados aquí en adelante tendrán como premisa la existencia de un grupo mayoritario de motores, conforme pudo apreciarse anteriormente en el gráfico 1. Estos motores de 15 CV componen casi un tercio de toda la instalación y son alimentados desde los tableros KG hasta los sub-tableros GMV por cables de cobre calibre 6 AWG (American Wire Gauge), aproximadamente 13,3 mm². Fue por tanto utilizado estos cables como ejemplo y chequeados a través de simulaciones para saber si estos disyuntores tipo *guardamotors* sugeridos servirían como prototipo para proteger adecuadamente a los mismos.

Un punto a ser considerado y no menos importante en este análisis consistió en que desde el proyecto original, los *integrales* en los tableros KG son solo de protección magnética, sin embargo, los *guardamotors* sugeridos en este estudio contaban con protección termo-magnética y protección por falta de fase. Para diseñar la curva del cable de cobre de 13,3 mm² con aislación EPR, fue utilizada una planilla electrónica y la fórmula empleada derivaba de la ecuación 1 de más abajo. La ecuación utilizada fue de Prysmian Cables & System [2], que refleja la capacidad térmica del aislante con respecto al tiempo en función a los amperes que circulan por la sección del material conductor, en este caso de cobre. Para este caso fue utilizado la siguiente formula:

$$\left(\frac{I}{S}\right)^2 \cdot t = 115,679 \cdot \log_{10} \left(\frac{T_2+234}{T_1+234}\right) \quad \dots\dots\dots (ec.1)$$

A modo de ejemplificar los estudios realizados, se muestra más abajo el gráfico 2, la curva del *guardamotor* modelo 3RV10 serie sirius de la Siemens y del cable de cobre de 13,3 mm² con aislación EPR. La curva del *guardamotor* fue conseguida mediante el software “Simaris curves” propio del fabricante, transpuesta en escala logarítmica con la capacidad térmica del conductor.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

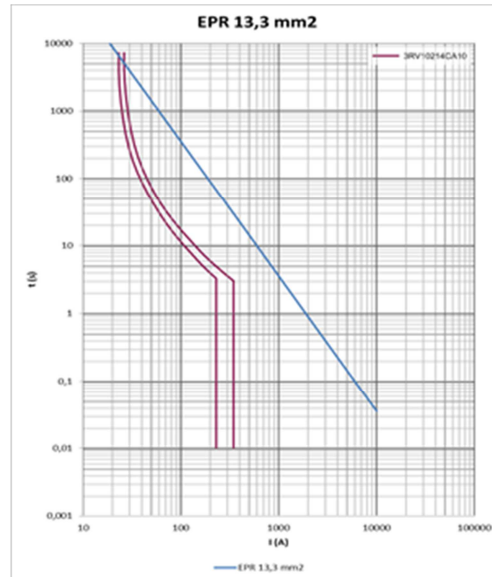


Gráfico 2. Transposición de curvas logarítmicas utilizando Excel, entre el *guardamotor* y la capacidad térmica del cable de fuerza tipo EPR 13,3 mm2

El análisis fue extendido posteriormente e individualmente a cada motor VVT del sistema de ventilación de aguas arriba, eje A-B, teniendo en cuenta sus capacidades en amperios. Inicialmente el propósito de estas sustituciones, *integrales* por *guardamotores*, fue el de generar sobresaliente necesarios para los demás tableros. Pero verificando sistemática y exhaustivamente el histórico de fallas y defectos en el sistema fue constatado que una de las probables y principales causas de moto-ventiladores quemados provenían de alimentación eléctrica con *integrales* con defectos. Se presenta a continuación en la figura 1 y a modo de ejemplificar el estudio realizado, el diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa, el cual muestra las causas de los motores averiados por defectos encontrados en los *integrales*. Las numeraciones dentro de los bloques del diagrama muestra como el moto-ventilador VVT-1410 fue afectado por los defectos de los *integrales* instalados en el KG-29 y en el GMV-1410, los cuales están indicados en las numeraciones de las SSA (Solicitud de Servicio Aperiódico) donde fueron registradas las ocurrencias.

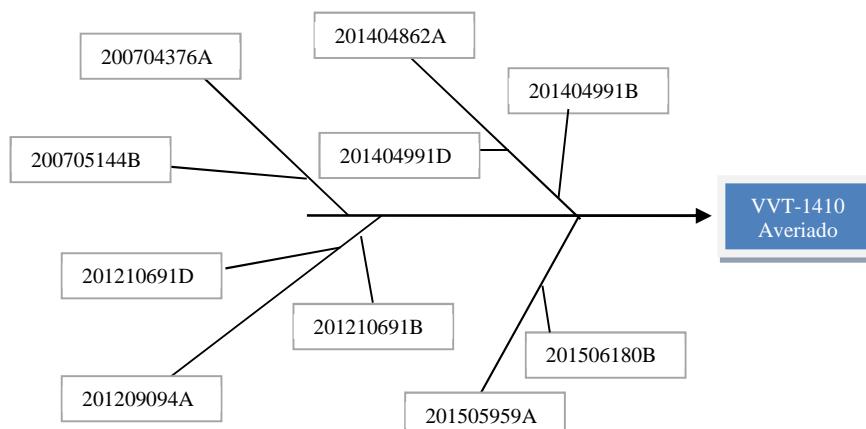


Figura 1. Diagrama de Ishikawa de un motor averiado por defectos en sus *integrales*. Los primeros 4 dígitos indican el año de la ocurrencia.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Como estadística del análisis realizado de las causas y efectos, se puede mencionar que aproximadamente en promedio en los últimos 4 años, 50 motores/año estaban indisponibles. Este estudio derivó a la conclusión que no sería suficiente sustituir solo las protecciones en los tableros KG, sino que también tendría que verificarse las protecciones de los sub-tableros GMV, los cuales también cuentan con *integrales* de características constructivas similares. Para comprender la problemática se muestra en la figura 2, el diagrama unifilar de un tablero KG típico con sus respectivos sub-tableros GMV y moto-ventiladores VVT correspondientes. En este diagrama unifilar se muestra al tablero KG-31 el cual es alimentado en 460Vca por el tablero QG-08. Este KG alimenta a 10 sub-tableros GMV con sus respectivos motores VVT.

Se puede ver las corrientes de cortocircuito en el circuito calculadas por el software “Simaris design” utilizando valores reales del sistema y además, que los moto-ventiladores son protegidos desde el proyecto original por dos disyuntores en serie, uno con protección magnética instalada en el KG y otra con protección termo-magnética en el GMV, pero ambos son similares constructivamente. Por tanto, cada motor cuenta en su línea de protección con dos *integrales* que en línea general están en final de vida útil.

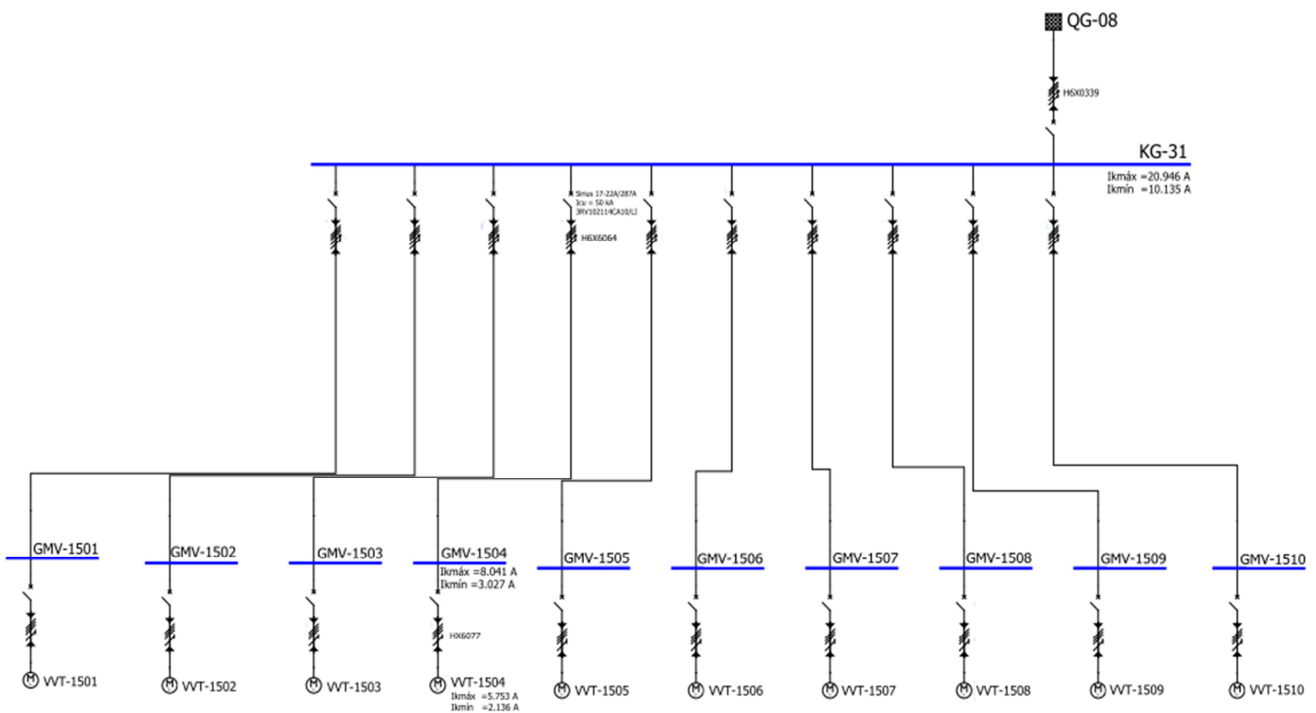


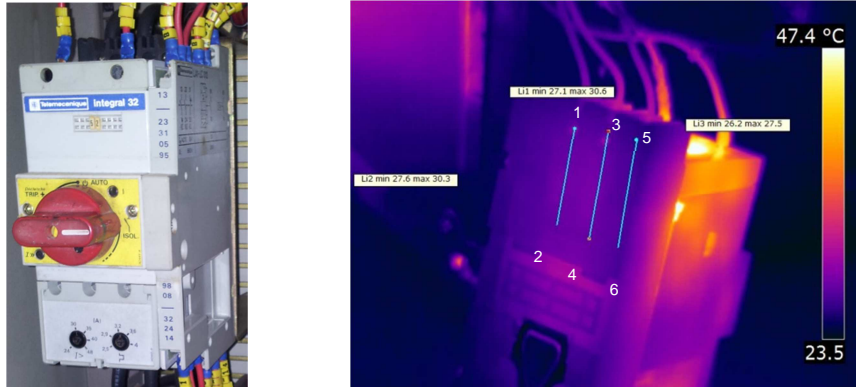
Figura 2. Diagrama unifilar típico de un tablero KG, GMV y VVT

Los defectos encontrados en estos *integrales* fueron verificados en bancada y fue constatado que mayoritariamente estos defectos radican en los resortes internos e individuales, uno por fase, que con el paso del tiempo perdían sus propiedades elásticas, o sea, su constante de elasticidad k , ley de Hooke, pudo haberse degradado y por consecuencia afectaban directamente a la fuerza ejercida entre los contacto eléctrico dentro del *integral*, en la parte específica que cumple la función de contactor. Otros defectos comunes encontrados en los *integrales* son los provenientes de las rupturas de los cojinetes internos.

A continuación serán mostrados imágenes térmicas efectuadas a *integrales* con defectos en una de sus fases. En la imagen de la izquierda se muestra a un *integral* instalado en un sub-tablero GMV que estaba con defecto. A la derecha se muestra la termografía efectuada en bancada.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Por tanto fueron realizados varios ensayos a un grupo de *integrales* disponibles en la oficina eléctrica de la MEG2, los cuales incluyeron imágenes térmicas ⁽¹⁾, ensayos de resistencia de aislación ⁽²⁾ y de resistencia de contacto ⁽³⁾. En estos ensayos fueron verificados que las mediciones de conductividad variaba en cada cierre y apertura del *integral*, por lo que indudablemente el principal responsable eran sus resortes internos.



Termografía realizada a un *integral* con defecto en sus contactos 5 y 6

Debido a que la protección del KG está en serie con la protección del GMV, se podría hacer una analogía con sistemas en serie, donde la confiabilidad total de este tipo de sistema es menor que la confiabilidad de cualquiera de sus componentes, o sea, la confiabilidad total es el producto de las confiabilidades individuales de cada componente. Formula relacionada de la confiabilidad en serie, donde R_s es la confiabilidad total del sistema y R_j corresponde a las confiabilidades individuales:

$$R_s = \prod_{j=1}^n R_j \quad \dots\dots\dots (ec. 2)$$

Según este punto de vista, teniéndose protecciones con cierta desconfianza, como es el caso de las protecciones de los *integrales*, se supuso que aunque coloquemos un disyuntor nuevo en el KG, o sea un *guardamotor*, y dejemos un *integral* en el GMV, la interacción de los dos en serie daría una confianza menor que si dejásemos una sola protección que podría estar en el KG. Por tanto de esta manera, estaba justificado técnicamente con estos ensayos y desde el punto de vista de confiabilidad, la necesidad de sustituir totalmente los *integrales* del sistema de ventilación para de esta manera aumentar la confiabilidad total.

- Instrumentos utilizados: ⁽¹⁾ Thermal imaging infrared camera, Flir T360
- ⁽²⁾ Insulation tester Megabras, mD 5075x.
- ⁽³⁾ Micro-ohmmeter Megabras, mPK 204e

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Siguiendo con esta línea raciocinio, fue necesario analizar la coordinación de las protecciones entre los tableros KG, GMV y motores VVT [3][4]. Para tal efecto fueron realizadas simulaciones utilizando el software EasyPower, el cual es una herramienta de ingeniería utilizada para análisis y diseño de sistemas eléctricos de potencia industriales [5].

A seguir serán presentadas tres situaciones utilizando simulaciones con datos reales de las protecciones, como también datos reales de los cables de fuerza entre los tableros KG-01, GMV-0104 y moto-ventilador VVT-0104. Estos tableros y sus características fueron utilizados como ejemplo para estas simulaciones por contar con configuraciones típica en el sistema. Inicialmente en la simulación (a) de más abajo se representa la configuración los tableros KG-01 y GMV-0104, ambos con *integrales*. Se puede percibir en esta simulación que los tramos de cables entre el KG-01 y GMV-0104 y entre el GMV-0104 y el VVT-0104 están protegidos por ambas protecciones y el motor VVT-0104 es protegido por el termo-magnético del GMV-0104. En la simulación (b) fue introducido un *guardamotor* en sustitución del *integral* del KG-01, pero ajustado su térmico a fondo de escala.

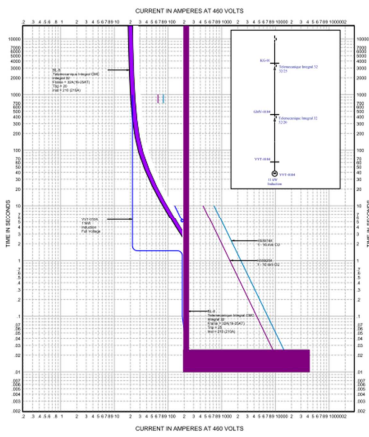
Se puede percibir que las curvas termo-magnéticas del *integral* y del *guardamotor* son prácticamente idénticas y están sobrepuestas. En esta situación se evaluó si sería conveniente sustituir el *integral* del GMV-0104 por un *guardamotor* o en todo caso por un relé térmico, o sino, colocar en el GMV-0104 una *seccionadora bajo carga* con el propósito de atender a la norma NR-10 [6] y poder por tanto realizadas maniobras locales con la posibilidad de colocar candados de seguridad. Para tener una visualización de esta situación fue generada una tercera simulación donde consta solo la protección termo-magnética del *guardamotor* en el KG-01 y una *seccionadora bajo carga* en el GMV-0104. Se pudo verificar que los dos tramos de cables de fuerza estaban debidamente protegidos pero para proteger al motor en función al tiempo de rotor bloqueado, debería achatarse la curva del *guardamotor* para abajo. Esto fue realizado en la simulación (c), donde con un ajuste del térmico del *guardamotor* fue posible demostrar que era posible proteger a los dos tramos de cables y también al motor del VVT-0104.

Esta última simulación fue muy interesante tanto del punto de vista técnico como del punto de vista de compra de nuevos materiales para el *retrofit*. Desde el punto de vista técnico se pudo observar que era posible esta configuración, donde la coordinación de las protecciones estaba garantizada, pero además con los accesorios disponibles de los *guardamotors*, se podría optimizar los disparos de alarmas con la concentración de los mismos desde un único disyuntor, ya que anteriormente estaban distribuidos entre los *integrales* del KG y GMV. En otras palabras, esto podría extenderse a los anunciadores de cualquier otro tablero KG del sistema, pudiéndose tener de esta manera la posibilidad de discriminar entre disparo magnético y disparo termo-magnético. En términos financieros también era conveniente, ya que en esta configuración se dejaría de adquirir 413 *guardamotors* que deberían sustituir a los *integrales* en los sub-tableros GMV. Como sustituto por tanto quedarían las *seccionadoras bajo carga*, que son más baratas comparativamente y además son más fiables desde el punto de vista del mantenimiento. En esta nueva propuesta de configuración en los GMV fue necesario incluir un contactor para poder realizar las maniobras de parada y arranque del motor vía botoneras, tal cual lo realizaba el *integral*.

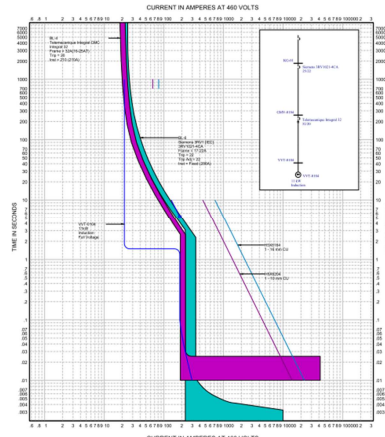
Para confirmar la posibilidad de implementación efectiva en campo de esta última configuración, simulación (c), fue necesario elaborar un proyecto eléctrico con las modificaciones necesarias entre los tableros KG y GMV. Para este caso fue instalado un prototipo en los tableros KG-29 y GMV-1404, donde se obtuvo resultados satisfactorios.

A continuación se muestran las 3 simulaciones de coordinación de las protecciones efectuadas, que resultaron de los datos reales introducidos en el software “EasyPower”. Se pudo verificar también en estas simulaciones las corrientes de corto-circuito monofásicas, bifásicas y trifásicas del tramo estudiado.

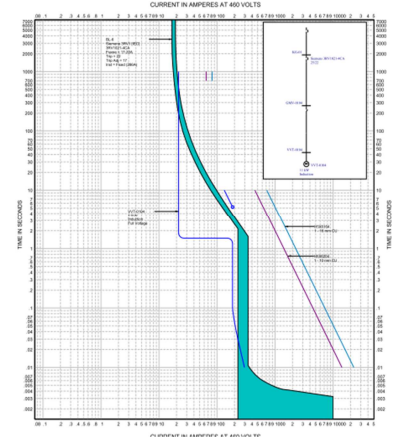
XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016



(a)



(b)



(c)

Como parte de los estudios eléctricos, también fueron realizadas oscilografías para medir las corrientes de arranque (I_a) en los moto-ventiladores de 15 CV y moto-bombas de 7,5 CV de los tableros KG y KH respectivamente. Ver figuras 3 y 4 relacionadas más abajo. Con esto se consiguió analizar si los disyuntores tipo *guardamotores* sugeridos protegerían debidamente en el arranque.

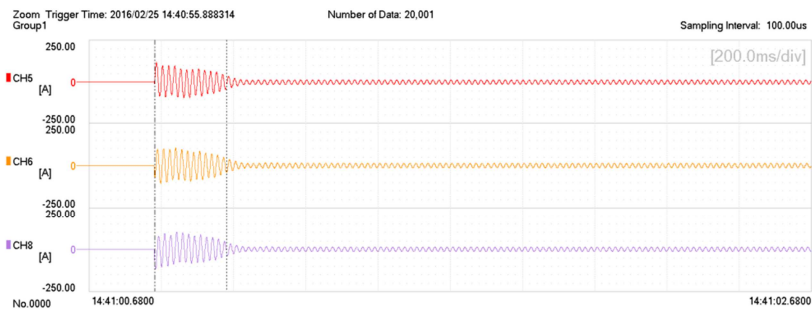


Figura 3. Oscilografía del arranque de un moto-ventilador de 15 CV del KG-01

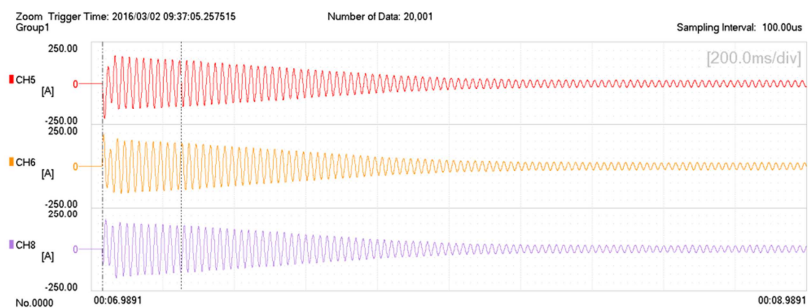
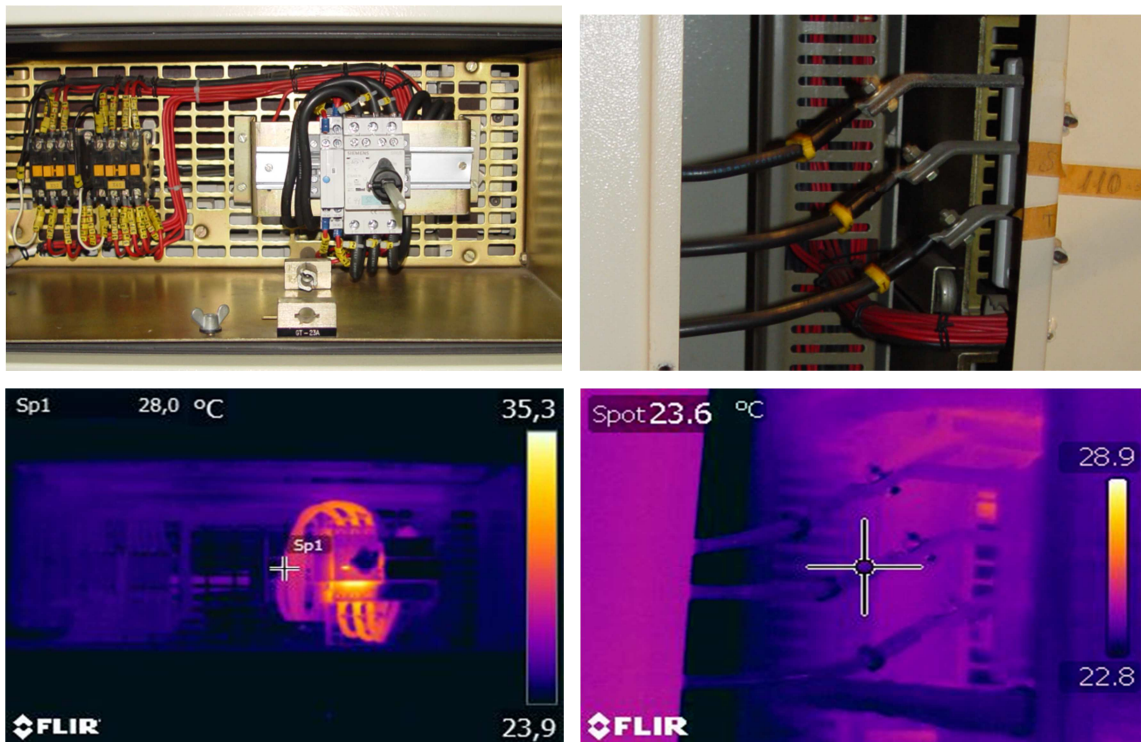


Figura 4. Oscilografía del arranque de una moto-bomba de 7,5 CV del KH-01

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

Todas las modificaciones mencionadas hasta el momento en este trabajo son resultados de los síntomas que presentaron los componentes de los tableros del sistema de ventilación. Estas anomalías fueron tratadas y solucionados caso a caso a través del *retrofit*.

A modo de contar con un panorama más amplio de la situación real en que se encuentran los demás componentes del sistema y que hasta el momento no denunciaban ninguna anomalía y poder además a partir allí, tomar decisiones para mediano plazo del sistema, fue realizado un chequeo completo vía termografía en uno de los tableros. Como referencia fue realizada la termografía en el tablero KG-01, el cual es un tablero típico de la ventilación de las unidades generadoras. Conforme se puede apreciar en las imágenes de más abajo y posterior a un análisis de ingeniería, fue verificado que dicho tablero y por ende, los demás tableros del sistema, están en óptimas condiciones operativas. Esto se debe en gran medida a que desde el proyecto original fue considerado utilizar materiales de primera calidad y con un factor de seguridad conservador, y sobre todo por los servicios de mantenimientos periódicos que son realizados a este sistema.



Imágenes reales y termográficas de un cubículo del KG-01 y sus conexiones eléctricas

Otra acción tomada por la ingeniería de mantenimiento eléctrica, adicional a este *retrofit*, fue la adquisición del primer maletín de prueba de la CHI para uso exclusivo en motores eléctricos, con la finalidad de analizar la situación en que se encuentran los moto-ventiladores y moto-bombas del sistema de ventilación. También se tuvo la visión de que este maletín no solo serviría para realizar mantenimiento predictivos en estos motores, sino que podría ser utilizado por otras áreas y sistemas de la CHI para verificar el estado real de todos los motores, tanto de alimentación alternada como continua, y poder acompañar las evoluciones de estos con respecto al tiempo. El maletín adquirido para realizar esta función fue de la marca PdMA, modelo MCEMax. Además con este maletín podría elaborarse informes técnicos y de esta manera la ITAIPU contaría con documentaciones de respaldo a la hora de justificar la aceptación o rechazo de motores reparados o realizar ensayos de aceptación de nuevos motores.



3. CONCLUSIONES

Este trabajo técnico demuestra los estudios y acciones que fueron tomadas en función a los síntomas presentados por los componentes del sistema de ventilación que sufrieron la acción del paso del tiempo. Las soluciones aplicadas por la ingeniería de mantenimiento resultaron en el *retrofit* al sistema, el cual consistía básicamente en sustituir varios componentes con fallas o defectos por otros con tecnología de vanguardia, y de esa manera dejar en condiciones óptimas los tableros hasta que sea concretizada la actualización tecnológica en la CHI que se tiene previsto realizar en los próximos años.

Se deja constancia que en el proceso de elaboración de este trabajo técnico, el sistema se encontraba con las tres situaciones mencionadas en las simulaciones (a), (b) y (c) realizadas, estando por tanto el *retrofit* de las protecciones en pleno andamio. También, que todas las mejorías efectuadas para este sistema fueron consensuadas, proyectadas y ejecutadas por el cuadro propio de la ITAIPU BINACIONAL.

Para resumir en números los trabajos de este *retrofit* se puede citar, sustitución total de 8.000 lámparas incandescentes por lámparas tipo led, sustitución de 106 relés de subtenión y 106 disyuntores de los transformadores de comando. Una vez culminado el *retrofit* serán sustituidos un total de 1.006 disyuntores *integrales* de todo el sistema.

Fueron agregadas varias mejorías en este proceso, siendo una de éstas el aumento de la confiabilidad. También puede citarse en este contexto la modularidad con que quedarán las protecciones de los tableros del sistema, sobre todo en los tableros KH, donde cada compartimiento estará compuesto por un *guardamotor* con sus auxiliares acoplado a un contactor con sus auxiliares. Esto facilitará resolver los problemas de falta de repuestos y también agrega flexibilidad al mantenimiento.

A esto hay que sumarle los esfuerzos realizados para aumentar la confiabilidad del sistema con la incorporación de mediciones predictivas y la inversión en equipos de medición dedicados de última generación.

4. REFERENCIAS

- [1] M. O. Oliveira, IEEE Member; A.S. Bretas, IEEE Senior Member, O. E. Perrone, UNaM University; J. H. Reversat, UNaM University; H. E. Muñoz, UNaM University; R. S. Orellana Paucar, Osinergmin. “Principales características de la corriente inrush en transformadores”, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Argentina.
- [2] Felipe Molinari de Matos. “Estudo de caso de coordenação e seletividade da proteção contra sobrecorrente em um sistema elétrico industrial”, trabalho final de curso da escola de Engenharia de São Carlos, Brasil, 2010.
- [3] João Mamede Filho. Instalações Elétricas Industriais, LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 8ª Edição, 2010.
- [4] Ronaldo Rossi. Proteção de Sistemas Elétricos Industriais. Volumen 1, FUPAI - Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, Itajuba - MG, Brasil, 2013.
- [5] Cláudio S. Margegam. Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais, Guia Prático de Curto-circuito, Engpower, 2016.
- [6] NR-10: Norma Regulamentadora do Ministerio de Trabalho e Emprego do Brasil sobre Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Portaria MTE 598 – 07.12.2004.