



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA**

**“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”**

**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA**

*Título: Mejoras al sistema de protección de descarga automática por frecuencia de los Turbogeneradores de Planta Termoeléctrica en la Empresa Comandante Pedro Sotto Alba.*

**Autor:** Manuel Llorens Patiño.

**Tutor:** MSc. Oscar Peña Guilarte.

**Consultante:** Ing. Geolvis Galano Urtate.

Curso 2014-2015

“Año 57 de la Revolución”



---

**Declaración de autoría.**

**Yo - Manuel Llorens Patiño.**

Autor de este Trabajo de Diploma, tutorado por el MSc. Oscar Peña Guilarte declaro la propiedad intelectual de este trabajo a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, para que disponga de su uso con la finalidad educativa que estime conveniente.

---

Diplomante

**Manuel Llorens Patiño.**

---

Tutor

**MSc. Oscar Peña Guilarte.**

---

Consultante

**Ing. Geolvis Galano Urtate.**



---

**Dedicatoria:**

*Cuando al culminar una meta deseada impone momentos de alegría, se deben tener presentes aquellas personas que con su constancia y dedicación contribuyeron a la realidad que representa llegar hasta el final, obviando de manera impredecible los obstáculos que la vida misma impone y en total conformidad con mis sentimientos dedico este logro personal:*

*A: Mi madre por no dejar de hacer nunca lo que fuera necesario en bien de mi superación.*

*A: Mi Padre, mi hermana, mis abuelos y mi esposa, por darme ánimos para seguir con mis estudios cuando más lo necesité.*

*Y en especial a la persona que más quiero en este mundo, mi hijo José Manuel que a pesar de ser muy pequeñito me dió las fuerzas necesarias para terminar mis estudios.*

*A todos les dedico este éxito.*



---

## **Agradecimientos.**

*Por la especial significación que tiene la culminación de este trabajo y de mis estudios, quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a mi familia en general, por abrirme cada puerta que se interpuso en mi camino, por la confianza que siempre depositaron en mí, por sus esfuerzos realizados en todas las esferas de la vida para que pudiera terminar este sueño que hoy es una hermosa realidad, a ese excelente colectivo de profesores por su sacrificio e incondicional apoyo que hicieron cumplir esta etapa de mi vida, a todos mis amigos y colegas que estuvieron cerca y al tanto de cuantos sucesos atravesamos, al personal del Laboratorio Eléctrico de la empresa Moa Nickel S/A Pedro Sotto Alba por la ayuda brindada en general, a mis tutores de la tesis por su valiosa colaboración y guía en el desarrollo de este proyecto, y a la Revolución Cubana por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional.*

*A todos ustedes les agradezco.*

*Mucha Gracias.*

---

## Resumen.

A partir de la necesidad de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba de proteger la integridad de los turbogeneradores de planta termoeléctrica, se proponen realizar mejoras al sistema de protección de descarga automática por frecuencia de los mismos. Para esto fue necesario el análisis del funcionamiento de las partes del circuito que componen dicho sistema. El presente trabajo tiene como objetivo el cambio del PLC ya existente por uno más moderno, con el fin de lograr el ajuste de la protección perteneciente a este, logrando una mejor velocidad de respuesta, mayor capacidad de supervisión, protección de los turbos y monitoreo del sistema, con la incorporación de la DAF al ESCADA (Citect).

El contenido del trabajo se dividió en tres capítulos, definidos de la siguiente manera:

**Capítulo 1;** Fundamentos teóricos de la investigación, Teoría de las protecciones. Búsqueda de información de eventos pasados por la operación incorrecta de la protección de descarga automática por frecuencia. **Capítulo 2;** Descripción detallada de la operación actual del sistema de descarga automática por frecuencia, DAF. Propuesta de sustitución del PLC S7-200 por un S7-300 sobre la base de las ventajas que ofrece este último para realizar el monitoreo de algunas variables eléctricas que intervienen en el sistema de protección. Introducción de las nuevas variables eléctricas del sistema de protección DAF en el ESCADA (Citect), para su monitoreo y supervisión. **Capítulo 3;** Nuevos ajustes efectuados en los relés pertenecientes a la protección de descarga por frecuencia. Desarrollo de una valoración económica de la propuesta.

---

## Summary.

Starting from the necessity of the company Major Pedro Sotto Alba of protecting the integrity of the turbo generators of Thermoelectric Plant, they intend to be carried out improvements to the system of protection of automatic discharge for frequency of the same ones. For this it was necessary the analysis of the operation of the parts of the circuit that compose this system. The present work already has as objective the change of the PLC existent for one more modern, with the purpose of achieving the adjustment of the protection belonging to this, achieving a better answer speed and bigger supervision capacity, monitored and protection of the turbo generators, with the incorporation of the DAF to the ESCADA (Citect).

The content of the work was divided in three chapters, defined in the following way: Chapter 1; Theoretical foundations of the investigation, Theory of the protection. Search of information of last events for the incorrect operation of the protection of automatic discharge for frequency. Chapter 2; detailed description of the current operation of the system of automatic discharge for frequency, DAF. Proposal of substitution of the PLC S7-200 for a S7-300 on the base of the advantages that he/she offers this last one to carry out the monitored of some electric variables that intervene in the protection system. Introduction of the new electric variables of the protection system DAF in the SCADA (Citect), for their monitored and supervision. Chapter 3; New adjustments made in the relays belonging to the discharge protection by frequency. I develop of an economic valuation of the proposal.

---

## Indice

Dedicatoria:.....	II
Agradecimientos. ....	III
Resumen. ....	IV
Summary. ....	V
Introducción General.....	1
Situación Problemática. ....	2
Objeto de estudio.....	2
Problema. ....	2
Campo de acción.....	3
Tareas.....	3
Resultados Esperados.....	4
Métodos a emplear en desarrollo de la investigación. ....	4
Hipotético-Deductivo: .....	4
La observación científica: .....	4
La entrevista:.....	4
Criterio de expertos:.....	5
Capítulo I. Marco contextual y Teórico.....	6
1.1 Introducción. ....	6
1.2 Estado del arte.....	6
1.3 Teoría de las Protecciones. ....	7
1.4 Estabilidad de frecuencia en sistemas.....	10

---

1.5 Protecciones de frecuencia y acciones de disparo de carga por frecuencia.....	11
1.6 Protección del sistema.....	13
1.7 Sistemas de protección.....	13
1.8 Funcionamiento de un sistema de protección de descarga automática por frecuencia (DAF).....	13
1.9 Lógica de desconexión automática de protecciones por baja frecuencia. ....	14
1.10 Programa de desconexión de cargas por baja frecuencia. ....	15
1.11 Clasificación de la descarga automática por frecuencia (DAF).....	16
1.12 Definición de un autómata programable. ....	17
1.13 Operación básica de un PLC. ....	17
Capítulo 2. Desarrollo de la experimentación de la investigación.....	20
2.1 Introducción. ....	20
2.2 Funcionamiento general de planta termoeléctrica. ....	20
2.3 Funcionamiento de la protección de descarga automática de frecuencia (DAF) antes de la implementación de las mejoras. ....	21
2.4 Eventos pasados por la operación incorrecta de la protección de descarga automática por frecuencia.....	22
2.5 Ajustes de la descarga automática por frecuencia, antes de la implementación de las mejoras.....	22
2.6 Mejoras del sistema de cascada de frecuencia. ....	24
2.7 Ventajas adquiridas con las mejoras implementadas en el sistema DAF. ....	28
2.8 Confección de los procedimientos de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la DAF.....	29
2.9 Operaciones realizadas para la comprobación del correcto funcionamiento del sistema DAF. ....	30
Capitulo #3 Análisis de los resultados y valoración técnica económica.....	32
3.1 Introducción. ....	32

---

3.2 Análisis técnico. ....	32
3.3 Propuesta de solución del problema. ....	32
3.3.1 Ajustes de la descarga automática por frecuencia, después de la implementación de los cambios. ....	33
3.4 Valoración Económica. ....	36
3.5 Análisis del TIR y el VAN. ....	37
3.6 Análisis Medioambiental. ....	38
Conclusiones generales. ....	39
Recomendaciones. ....	40
ANEXOS	

---

## **Introducción General.**

Las centrales Termoeléctricas poseen entre sus sistemas de control y protección, disparos contra variaciones de frecuencia, denominadas generalmente DAF;(Descarga Automática por Frecuencia) esta es la encargada de proteger los turbogeneradores ante una desconexión del SEN, ante perturbaciones o fallas, para así poder mantener una potencia activa constante y evitar los posibles disparos innecesarios, una forma de lograrlo es liberando cargas en función de las variaciones de frecuencia existentes en barras.

Desde su construcción, la Empresa Pedro Sotto Alba ha contado con numerosos proyectos de modernización de sus sistemas de control y protección. La mayoría de las protecciones actuales son modernas, pertenecientes a la familia de los relés de la General Electric Multilin, con el objetivo de garantizar mayor seguridad y confiabilidad posible hacia los elementos a proteger, en este caso los turbogeneradores de Planta Termoeléctrica.

Para el estudio de las protecciones eléctricas se requieren de muchos requisitos y un análisis profundo del amplio campo de trabajo. Un sistema eléctrico debidamente protegido, garantiza un servicio nivelado y seguro a todos los consumidores de energía.

Las protecciones que se coloquen deben ser bien seleccionadas y a su vez correctamente regularizadas para evitar dañar algún equipo o personal de trabajo y así minimizar gastos en nuevos equipamientos.

La Planta Termoeléctrica presenta una protección denominada descarga automática por frecuencia (DAF), la cual tiene como función la desconexión de



---

---

carga ante perturbaciones o disparos indeseados del Sistema Electroenergético Nacional SEN, esta protección en ocasiones ha tenido a raíz de su incorrecta operación, alrededor de 3 a 5 disparos indeseados entre los años 2011 y 2013, los cuales han estado condicionados a las deficiencias de los ajustes implementados en la misma.

### **Situación Problemática.**

Deficiencia en la operación de la protección de descarga automática por frecuencia de los Turbogeneradores de Planta Termoeléctrica, ante desconexión del Sistema Electroenergético Nacional (SEN).

Esto trae como consecuencia que ante una salida del SEN los turbogeneradores no generan la potencia necesaria para mantener el proceso productivo en funcionamiento, ya que al tener tanta carga empiezan a perder velocidad (rpm) y a la vez a disminuir la frecuencia, originando la desconexión escalonada de las distintas plantas de procesos, cuando en ocasiones no es necesario separarlas a todas, provocando al final el disparo de los turbos, donde las pérdidas económicas se harían sentir ante un paro total de la fábrica.

### **Objeto de estudio.**

Protección de descarga automática por frecuencia (DAF) de los Turbogeneradores, de Planta Termoeléctrica (PSA).

### **Problema.**

Deficiente operación de los turbogeneradores de Planta Termoeléctrica, ante disparos indeseados por averías en el Sistema Electroenergético Nacional



---

---

(SEN), causados por la operación incorrecta de la protección de descarga automática por frecuencia (DAF).

### **Campo de acción.**

Protecciones eléctricas

### **Objetivos Generales.**

Proponer mejoras al sistema de protección de descarga automática por frecuencia (DAF) de los turbogeneradores de planta termoeléctrica, sobre la base de un análisis integral de sus principales elementos.

### **Hipótesis.**

Si se hace un análisis más detallado sobre la dinámica del proceso de desconexión automática por frecuencia ante la separación del SEN se podría proponer mejoras que permitan garantizar una mayor confiabilidad y velocidad de repuesta de la protección DAF de los turbogeneradores de la planta termoeléctrica.

### **Tareas.**

1. Revisión bibliográfica sobre el tema a tratar.
2. Búsqueda de información de eventos pasados por la operación incorrecta de la protección de descarga por frecuencia.
3. Descripción detallada de la operación actual del sistema de descarga automática por frecuencia, DAF.
4. Proponer nuevos ajustes en los relés pertenecientes a la protección de descarga por frecuencia, con la sustitución del PLC S7-200 por un S7-300 sobre la base de las ventajas que ofrece para realizar el monitoreo de



---

algunas variables eléctricas que intervienen en el sistema de protección, introduciendo las del sistema de protección DAF en el ESCADA (Citect), para su monitoreo y visualización.

5. Desarrollo de una valoración económica de la propuesta.

### **Resultados Esperados.**

1. Mayor velocidad de repuesta de la protección de descarga por frecuencia de Planta Termoeléctrica.
2. Confección de los Procedimientos de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la DAF.
3. Mayor confiabilidad y eficiencia en la operación de la DAF.

### **Métodos a emplear en desarrollo de la investigación.**

En el diseño de la investigación, se tuvieron en cuenta los siguientes métodos:

**Análisis y Síntesis:** Para el estudio y análisis del sistema de descarga automática por frecuencia, DAF, se tomaron en cuenta los antecedentes y los trabajos precedentes realizados anteriormente, en función del mejoramiento de dicho sistema, para la reducción de las pérdidas por concepto de equipamiento y producción.

**Hipotético-Deductivo:** Para la elaboración de la hipótesis, cuya veracidad se intentará materializar en la investigación.

**La observación científica:** Para estar al tanto del desarrollo y el comportamiento del objeto de estudio de la investigación, y la validación de los resultados esperados en esta.

**La entrevista:** Para recopilar informaciones referentes al comportamiento precedente y actual del objeto de estudio, con el fin de diagnosticar su estado,



---

teniendo en cuenta las necesidades que proporcionaran un camino correcto en la elaboración de un plan de acciones en función de la selección de un método eficaz para lograr los objetivos trazados.

**Criterio de expertos:** En la proposición de las mejoras a implementar como resultado de la investigación, de acuerdo a los resultados esperados en el proceso investigativo y de implementación.



---

## **Capítulo I. Marco contextual y Teórico.**

### **1.1 Introducción.**

Toda instalación eléctrica debe estar provista de una serie de protecciones que la hagan segura, tanto desde el punto de vista de los conductores y dispositivos eléctricos conectados, como de los bienes materiales y las personas que van a relacionarse con ella. Las protecciones eléctricas están destinadas a proteger de cortocircuitos o fallas, y de condiciones anormales los diferentes elementos de un circuito: Generadores, Transformadores, Motores, Barras de Pizarras, alimentadores etc. Con la adquisición de los relés electrónicos digitales MULTILIN, se incorporaron a los esquemas nuevas protecciones eléctricas que anteriormente no se venían utilizando, por lo que requirió establecer una política adecuada sobre la explotación de todas las protecciones eléctricas. Así de esta forma se propondrán las mejoras a realizar en el Sistema de Descarga Automática por Frecuencia de los Turbos Generadores de Planta Termoeléctrica en la Empresa PSA, las características y funcionamiento de las partes que componen dicho sistema.

### **1.2 Estado del arte**

Las protecciones de los diversos elementos de los sistemas eléctricos están diseñadas para eliminar los defectos que pudieran aparecer en cualquiera de ellos. La aparición de defectos eléctricos en el sistema, junto con las maniobras ordenadas por los sistemas de protección para su aislamiento, originan efectos dinámicos en los generadores, que se traducen en oscilaciones de las diferentes magnitudes eléctricas, mantenidas aun después de despejar los mismos. Incluso, estas condiciones de perturbación podrían llegar, en los casos más graves, a desencadenar la pérdida de sincronismo de los turbogeneradores.



---

Para el desarrollo de este trabajo de tesis se hicieron referencias a los siguientes trabajos de tesis y documentos:

**1. Tesis de Variantes de operación de la SE 110 kV PSA, año 2014.**

En este trabajo se realiza una valoración general de las principales propiedades de las protecciones eléctricas, la misma se toma como referencia en este trabajo para dar inicio al desarrollo de este tema.

**3. Metodología para la selección y Coordinación de Protecciones Eléctricas.**

Díaz Aguirre, Yordilexis y Pelier Samón, Leonardo. 2004. Moa: s.n., 2004.

**4. Catálogos de relés Multilin, GE Industrial. 2004.750/760 Feeder Management Relay. Canada: s.n, 2004.**

**5. Manual de operaciones de Planta Termoeléctrica.**

### **1.3 Teoría de las Protecciones.**

Las protecciones tienen unos 70 años de antigüedad, a lo largo de los cuales se han realizado grandes evoluciones con la utilización de la tecnología. Los fenómenos de la red siguen siendo prácticamente los mismos, aunque las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías permiten modificar todos los fenómenos derivados de las perturbaciones en el sistema eléctrico, para hacer un mejor uso. Para estas se deben tener en cuenta tres principios básicos de las protecciones:

- Todas las fallas deben considerarse como transitorias.
- Si la falla es permanente, se deben de aislar los circuitos energizados lo más rápido posible de estas.
- Se debe afectar la menor parte posible de los circuitos.

A todo relé o sistema de protección, se le exigen cuatro requisitos fundamentales para que realice su función correctamente. Estos requisitos son:



- 
1. Sensibilidad.
  2. Selectividad
  3. Velocidad de respuesta
  4. Fiabilidad.

### **1.3.1 Descripción de las características de las protecciones eléctricas.**

#### Sensibilidad.

Un relé o sistemas de protección debe ser lo suficientemente sensible como para operar en las condiciones de falla mínima que se puedan dar en la parte del sistema que tenga encomendada. En cualquier sistema eléctrico, en varias ocasiones en el día y durante las distintas estaciones del año, la carga puede variar entre límites muy amplios. Para cubrir estas exigencias cambiantes de la carga solicitada, es preciso poner diferentes combinaciones en la generación con el fin de atender la demanda de la forma más adecuada. La condición de mínima exigencia de generación es generalmente la que va a definir la sensibilidad de las protecciones. En estas condiciones, circulará por la protección la mínima corriente de falta al producirse un cortocircuito y este deberá ser lo suficientemente sensible para detectar esa falta.

#### Selectividad.

La selectividad de un relé de protección o de un sistema de protección determinada es la posibilidad de escoger adecuadamente dentro de que zona encomendada y después disparar los elementos necesarios para despejar la falta. Las protecciones deben diferenciar entre aquellas faltas para las que deben de operar por haberse producido en los propios equipos que protegen, de las faltas que se produzcan en otros equipos para las que no deben de operar. En ocasiones las protecciones no son seleccionadas con el cuidado debido y ello implica el que no se vean afectadas por las faltas que se



---

---

produzcan fuera de los equipos o de las zonas que tienen bajo su responsabilidad. Otro tipo de protecciones, con actuación diferida en faltas fuera de su zona encomendada, son consideradas relativamente selectivas. En estas protecciones generalmente, la selectividad se obtiene a través de diferentes ajustes de los niveles de respuesta y de los tiempos de operación, en coordinación con los que se pretende sean selectivos.

Velocidad de respuesta.

La rapidez es un aspecto esencial para el correcto uso de las protecciones eléctricas, puesto que estas garantizan una respuesta eficaz para casos de elementos dañados, por ende evita que se produzcan mayores desperfectos debidos a los efectos del cortocircuito y de esta manera, reducir los costos de reparación y el de su permanencia fuera de servicio. La rapidez de operación tiene además, repercusión directa en la estabilidad general del sistema eléctrico.

Fiabilidad.

Otro de los requisitos indispensables para un satisfactorio funcionamiento de las protecciones es que debe de ser fiable, lo que está en la medida del grado de confianza de que un sistema de protección va a actuar correctamente. Este término de fiabilidad trae incluido dentro de sí dos conceptos. Por un lado, la obediencia que es la cualidad de que una protección opere correctamente cuando es requerido para operar y por otro lado la seguridad que es la cualidad de no operar ante unas causas extrañas, evitando actuaciones incorrectas. La fiabilidad de un sistema de protecciones depende, en primer lugar, de la fiabilidad de los propios relés y en segundo lugar, de su aplicación, de su correcta instalación y de su mantenimiento preventivo.



---

#### **1.4 Estabilidad de frecuencia en sistemas.**

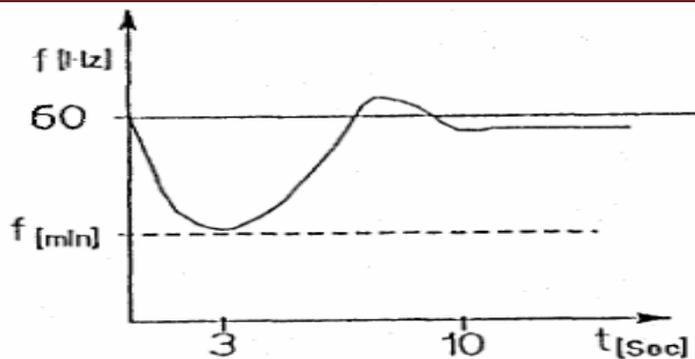
La estabilidad en frecuencia es la habilidad de un sistema eléctrico de potencia, de restablecer la frecuencia luego de una perturbación severa de desbalance entre generación y carga. Depende de la habilidad de mantener o restablecer el balance entre generación y carga, con mínima pérdida de carga. La pérdida de esta es un hecho indeseado pero en muchos casos necesario e inevitable a la hora de preservar el resto del sistema eléctrico.

Generalmente los problemas de estabilidad en frecuencia están asociados a insuficiente respuesta de los equipos, coordinación escasa entre controles y protecciones o poca reserva de generación. Los problemas de estabilidad en frecuencia pueden involucrar tiempos de segundos o fracciones de segundos (fenómenos de corto plazo) como el disparo por subfrecuencia y los controles de los generadores y protecciones. O pueden involucrar tiempos del orden de minutos (fenómenos de largo plazo) como los relacionados a las plantas motrices de los generadores (las turbinas, calderas, etc.) y los reguladores de tensión. La inestabilidad en frecuencia de corto plazo, conlleva a desconexiones en cuestión de segundos en el sistema.

Cuando sale de servicio de forma inesperada una unidad generadora, se pierde el balance entre potencias, la frecuencia del sistema comienza a disminuir, y la variación de esta tiene pendiente negativa.

En realidad, un sistema con un desbalance entre generación y carga, llega a una frecuencia mínima y posteriormente recupera una frecuencia estable, como se indica en la figura 1.





**Figura 1. Comportamiento de la Frecuencia hasta Estabilizarse.**

### 1.5 Protecciones de frecuencia y acciones de disparo de carga por frecuencia.

Protección de generadores.

Los generadores eléctricos y sus turbinas (plantas motrices) pueden resultar dañados si, estando cargados, funcionan fuera de su frecuencia nominal. Es por ello que los generadores cuentan con protecciones propias de sobre y subfrecuencia, que operan por bajo nivel o frecuencia absoluta, que los desconectan del sistema eléctrico si la frecuencia es inadmisibles para ellos. Los conjuntos generador - turbina a vapor tienen rangos admisibles de frecuencia mucho más estrictos que los con turbinas hidroeléctricas.

Cuando una unidad generadora sale de servicio en forma inesperada, se pierde el balance entre potencias y como se vio, la frecuencia del área comienza a disminuir. Cuando hay una rápida caída de esta, la respuesta de los controles de los generadores del sistema es insuficiente y lenta a la hora de frenar la caída de velocidad en el eje de la máquina, y es posible que se llegue a los umbrales de disparo de las protecciones de subfrecuencia de algunos generadores, si estos son separados de la red por sus protecciones de



---

---

frecuencia, la situación del sistema empeoraría (se incrementaría el desbalance de potencias) y la velocidad de la caída de frecuencia aumentaría, llevando a más salidas de generadores por subfrecuencia.

La operación de un generador a una frecuencia distinta a la nominal es producida principalmente por dos razones.

1. Exceso de generación en el sistema de potencia, por pérdida de una carga grande o por la salida de operación de una línea que transmitía gran cantidad de potencia. En este caso el torque mecánico impuesto por la turbina es mayor al torque eléctrico de la carga, produciendo un incremento en la velocidad del rotor y por tanto un aumento de la frecuencia.
2. Sobrecarga del generador debido a la pérdida de un generador grande en el sistema de potencia. En este caso, el generador operara a una frecuencia menor a la nominal, debido a que el torque eléctrico de la carga es mayor al torque mecánico de la turbina, lo que resulta en un torque de desaceleración. La baja frecuencia es considerada un problema mayor a la sobre frecuencia, debido a que al ser esta producida por un exceso de carga en el sistema es muy difícil de controlar. El regulador de velocidad podrá actuar para corregir el equilibrio entre el torque mecánico y eléctrico, solo hasta cuando la potencia eléctrica (potencia de la carga), sea menor a la máxima potencia mecánica disponible de la turbina. En general la baja frecuencia resulta ser más crítica que la sobre frecuencia porque el operador no tiene la opción directa del control.



---

## **1.6 Protección del sistema.**

Por ello son necesarias acciones complementarias de emergencia para que la frecuencia no llegue a los umbrales antes mencionados. La principal protección sistémica automática para prevenir interrupciones del servicio luego de salidas inoportunas de unidades generadoras son los esquemas de disparo de carga por subfrecuencia.

La dinámica del sistema ante una pérdida de generación depende fuertemente de las condiciones iniciales de operación, la importancia de la respuesta de los sistemas de control, etc., por lo que por métodos clásicos es trabajosa la determinación de la cantidad mínima de carga a disparar. La idea es separar carga en la cantidad mínima necesaria y no más, para mantener el sistema de potencia estable.

## **1.7 Sistemas de protección.**

El disparo insuficiente de carga, no evitará que la caída de la frecuencia continúe. El disparo excesivo de carga, producirá cortes innecesarios a ciertas cargas. La protección por subfrecuencia, puede ser temporizada o instantánea y para operar la frecuencia debe haber descendido hasta el umbral ajustado (la subfrecuencia se detecta ya avanzado el fenómeno).

## **1.8 Funcionamiento de un sistema de protección de descarga automática por frecuencia (DAF).**

Las protecciones de los diversos elementos de los sistemas eléctricos están diseñadas para eliminar las fallas que pudieran aparecer en cualquiera de ellos. La aparición de defectos eléctricos en el sistema, junto con las maniobras ordenadas por los sistemas de protección para su aislamiento, originan efectos dinámicos en los generadores, que se traducen en oscilaciones de las diferentes magnitudes eléctricas, mantenidas aun después de despejar los



---

mismos. Incluso, estas condiciones de perturbación podrían llegar, en los casos más graves, a desencadenar la pérdida de los propios grupos generadores. En consecuencia, las protecciones de los diferentes elementos del sistema deberían tratar de ofrecer condiciones de despeje de defectos (tiempo de respuesta y selectividad), que tiendan a evitar las posibles consecuencias graves, descritas anteriormente.

En los sistemas eléctricos de potencia uno de los métodos utilizados para proteger los generadores es la desconexión de cargas para evitar la pérdida de sincronismo, considerando que es preferible afectar el servicio a algunos consumidores en forma controlada, que llegar al colapso del sistema donde se afectaría todo el complejo en su totalidad, incluyendo principalmente la parte generadora.

El objetivo de la desconexión automática de carga por alteraciones en la frecuencia es restablecer el equilibrio carga-generación y proteger de esta forma la integridad de los turbogeneradores.

### **1.9 Lógica de desconexión automática de protecciones por baja frecuencia.**

Ante circunstancias de mínima frecuencia (UF), la protección principal (DAF) deberá disponer de diversos escalones de disparo de cargas, en función de la bajada de frecuencia. El objetivo del deslastre de cargas es evitar la caída de la frecuencia a valores inadmisibles.

Cuando el sistema está en operación estable a su frecuencia nominal, la potencia mecánica primaria de accionamiento de los generadores son igual a la suma de la potencia activa de todas las cargas conectadas, más las pérdidas



---

de potencia activa en el sistema. Cualquier desequilibrio significativo de esta condición, originara un cambio en la frecuencia del sistema.

Si en un momento dado la generación es superior a la demanda, el exceso de energía se almacena en forma de energía cinética en el rotor de los generadores, produciéndose una aceleración de los mismos que determina un aumento de la frecuencia del sistema. Por el contrario, si la demanda es superior a la generación, el déficit de energía se toma de la energía cinética de los rotores, produciéndose una disminución de su velocidad, que determina una caída en la frecuencia.

#### **1.10 Programa de desconexión de cargas por baja frecuencia.**

Lo ideal de un programa de desconexión de cargas seria que pudiera reconocer rápidamente el déficit de generación de potencia activa, determinar con seguridad el grado de sobrecarga y en consecuencia, desconectar la carga precisa para restablecer la frecuencia nominal del sistema. Esto es posible realizarlo con bastante exactitud en la empresa ya que es un complejo relativamente pequeño.

Antes de desarrollar e implementar un programa de desconexión de cargas será necesario:

- Establecer la carga máxima que hay que desconectar y el nivel de frecuencia al que se va a iniciar la desconexión.
- Fijar la caída máxima permisible de la frecuencia y la carga a desconectar para los diferentes escalones de frecuencia.
- Marcar los tiempos máximos permisibles de operación a bajas frecuencias.



---

La carga a desconectar debe ser aquella que permita restablecer la frecuencia del sistema a su valor nominal (60 Hz) o a una próxima a esta. Si se restablece a un nivel superior a los (59 Hz) la reserva rodante de potencia activa del sistema debe absorber el exceso de carga mediante la intervención de los sistemas de control de velocidad y restablecer la frecuencia nominal de funcionamiento.

### **1.11 Clasificación de la descarga automática por frecuencia (DAF).**

Está destinada a detener la disminución de la frecuencia. Es de acción rápida y los pasos se ajustan para diferentes valores. Existen otras protecciones o controles encargados de elevar la frecuencia después de una operación de esta protección y así evitar que se mantenga a un nivel bajo las magnitudes eléctricas de generación, también evita su disminución cuando aumenta relativamente lento el déficit de potencia generada durante las averías. Esta protección puede ser ajustada con valores mínimos de frecuencia y con diferentes ajustes de tiempo de operación.

La potencia activa a desconectar por la acción de la DAF debe cumplir con dos objetivos fundamentales:

1. Restablecer el valor de la frecuencia después de la acción de la protección. En este caso la magnitud de la potencia activa de la carga a desconectar no debe ser menor del 10% de la carga de sistema.
2. Evitar que la frecuencia se mantenga a un nivel bajo o continúe su disminución, cuando aumenta relativamente despacio el déficit de potencia activa generada por averías en el sistema. Para este objetivo la cantidad de carga a desconectar deberá ser mayor o igual al 40% de la carga a desconectar por la DAF.



---

### **1.12 Definición de un autómata programable.**

En la actualidad, no se puede entender un proceso complejo de alto nivel desarrollado por técnicas cableadas. El ordenador y los autómatas programables han intervenido de forma considerable para que este tipo de instalaciones se hayan visto sustituidas por otras controladas de forma programada.

El Autómata Programable Industrial (API) nació como solución al control de circuitos complejos de automatización. Por lo tanto se puede decir que un API no es más que un aparato electrónico que sustituye los circuitos auxiliares o de mando de los sistemas automáticos.

El Autómata Programable o PLC (*Programmable Logic Controller*) no es más que un aparato electrónico que utiliza circuitos integrados en lugar de los dispositivos electromecánicos a llevar a cabo las funciones de mando. Un PLC supervisa las entradas, toma decisiones basadas en su programa, y controla las salidas para automatizar un proceso o máquina.

Los PLC son capaces de guardar instrucciones para hacer funciones como; secuenciar, temporizar, contar, aritmética, manipulación de datos, comunicación, controlar las máquinas industriales y procesos.

### **1.13 Operación básica de un PLC.**

La entrada acepta una variedad de signos digitales o analógicos de varios dispositivos (los sensores) y los convierte en un signo lógica que puede usarse por el CPU. El CPU toma las decisiones y ejecuta instrucciones del mando basadas en las instrucciones del programa en la memoria. Los módulos de salida convierten las instrucciones de mando del CPU en un signo digital o



---

---

analógico que puede usarse para controlar varios dispositivos (los actuadores). Un dispositivo de la programación se usa para entrar las instrucciones deseadas. Estas instrucciones determinan lo que el PLC hará para una entrada específica. Un dispositivo de interface de operador permite desplegar la información del proceso y los nuevos parámetros del mando sean entrados.

### PLC SIEMENS.

Siemens fabrica varios productos de los PLC de la familia de Simatic S7, entre esto están; el S7-200, S7-300, y el S7-400. Se usan los S7-300 y 400 en aplicaciones más complejas que el S7-200. Estas aplicaciones requieren un número mayor de las I/O. Ambos los 300 y 400 son modulares y extensibles.

#### Simatic S7-200.

El S7-200 es el PLC más pequeño de la familia SIMATIC S7. La unidad central de proceso (CPU) está dentro del PLC. Las entradas y salidas (I/O) son los puntos de mando de sistema. Las entradas supervisan los dispositivos del campo, como los interruptores y sensores. Las salidas controlan otros dispositivos, como los motores, bombas, iluminación, apretura de las válvulas etc. El S7-200 es ideal para las aplicaciones pequeñas como los ascensores, las máquinas mezcladora. También son usados en las aplicaciones industriales más complejas como embotellar y las máquinas para empaquetar.

#### Simatic S7-300.

El sistema de mini autómatas modulares para las gamas baja y media, con un amplio abanico de módulos para una adaptación óptima a la tarea de automatización en particular. De aplicación flexible gracias a la posibilidad de realizar estructuras descentralizadas e interconexiones por red. Cómodo de aplicar por su facilidad de uso y a su instalación simple y sin necesidad de



---

ventilación. Ampliable sin problemas en el caso de que aumenten las tareas y tiene gran cantidad de funciones integradas.



---

## **Capítulo 2. Desarrollo de la experimentación de la investigación.**

### **2.1 Introducción.**

En este capítulo se realiza una descripción detallada del principio de operación del sistema de protección DAF, reflejando los valores de ajustes anteriores a los cambios realizados, así como la propuesta de mejoras al sistema en general con los nuevos cambios a implementar.

### **2.2 Funcionamiento general de planta termoeléctrica.**

La Empresa Pedro Soto Alba cuenta en Planta de Termoeléctrica con dos alimentadores provenientes del Sistema Electro energético Nacional SEN, denominados UT-1 y UT-2, estos enlazados a tres sesiones de barras denominadas sección 100, 200 y 300 todas ellas con sus respectivos interruptores de enlace TIE 100/200 y TIE 200/300, además posee dos Turbogeneradores denominados TG-1 y TG-2 de 7.5 MW respectivamente, conectados a las secciones de barra 100 y 200, estas son las encargadas de alimentar a través de interruptores, todas las cargas de la empresa a una tensión de trabajo de 13.8 kV. (Se hace referencia en los anexos 10,11 y 12).

Posee además 4 calderas de vapor, encargadas de generar todo el vapor consumido por las plantas de proceso y el necesario para el correcto funcionamiento de los turbogeneradores, a través de turbinas.

Esta planta por su complejidad presenta varios sistemas de protecciones, entre uno de ellos, se encuentra el de descarga automática por frecuencia (DAF), el cual tiene como principal función, el deslastre de carga de los turbos ante una separación por falla del sistema electro energético (SEN), este sistema de protección es el objeto de estudio de este trabajo de diploma.



---

### **2.3 Funcionamiento de la protección de descarga automática de frecuencia (DAF) antes de la implementación de las mejoras.**

Este sistema está equipado con varios equipos de protección y control, entre ellos se encuentran los relés de protección de la Multilin, modelo SR-750, UR F60, sistema de control y supervisión a través de PLC S7-200, con CPU-124, además de otros tales como, interruptores de fuerza y relés de control. Esta protección es la encargada de proteger los turbogeneradores ante una falla del Sistema Electro energético Nacional (SEN), la misma chequea el estado de los siguientes elementos de fuerza.

- ✓ Interruptor del UT-1.
- ✓ Interruptor del UT-2.
- ✓ Interruptor del TG-1.
- ✓ Interruptor del TG-2.
- ✓ Interruptores denominados AL-1, AL-2, CCD-2, OH-2 y OH-3/4.

Cuando existe una desconexión de los interruptores UT-1 y UT-2 por algún tipo de falla o avería, toda la carga instalada es transferida a los turbogeneradores, los cuales no son capaces de asumir dicha potencia activa requerida por las cargas, causando un frenado en el eje de la máquina y consecuentemente un posible disparo, para evitar este frenado o disminución brusca de la velocidad de la maquina (Potencia Activa) se implementó dicha protección DAF, la cual registra en el PLC S7-200 los estados de los interruptores, estos en la lógica de PLC activan tres grupos de ajuste (G2, G3 y G4) en los diferentes relés de protección de los interruptores que a ella pertenecen, denominados AL-1 (Planta de ácido), AL-2 (Planta de ácido), CCD-2 (planta de lavaderos), OH-2 (línea aérea a planta de Coral – Secado) y OH-3/4 (línea aérea a Planta de Pulpa).



---

---

## **2.4 Eventos pasados por la operación incorrecta de la protección de descarga automática por frecuencia.**

Este sistema debido a eventos de fallas ocurridas, ha presentado ciertos retrasos en la rapidez de repuesta de la protección (DAF), trayendo como consecuencia el disparo indeseado de las maquinas generadoras, lo cual ha conllevado a la desenergización de las plantas de proceso y por consecuente la parada total de producción de la Empresa. En algunas ocasiones no ha implementado el paro total pero a raíz de la lenta operación de descarga automática los turbogeneradores en su totalidad se han visto forzados a mantener valores de rpm (revoluciones por minuto) y frecuencia no establecidos para su correcto funcionamiento.

## **2.5 Ajustes de la descarga automática por frecuencia, antes de la implementación de las mejoras.**

En las tablas 1, 2 y 3 se muestran los ajustes de frecuencia y tiempo en que se encuentran los distintos alimentadores que pertenecen a la cascada de frecuencia, siendo estos los valores ajustados en los SR-750 para los distintos grupos de disparo por baja frecuencia de cada uno de ellos.

**Tabla 1. Ajustes de Frecuencia vs Tiempo antes de las mejoras al sistema.**

<b>Nº</b>	<b>Alimentadores</b>	<b>Carga del alimentador</b>	<b>Ajuste de frecuencia</b>	<b>Ajuste de tiempo</b>
<b>1</b>	OH-2	0.86 MW	58.5 Hz	3 seg
<b>2</b>	OH-3 y 4	0.67 MW	58.5 Hz	3 seg
<b>3</b>	AL-2	2.60 MW	58.5 Hz	3 seg
<b>4</b>	CCD-2	0.75 MW	57.5 Hz	6 seg
<b>5</b>	AL-1	2.34 MW	57.0 Hz	7 seg



**Grupo-2;** Este opera con estas características, UT-1 Interruptor Abierto, UT-2 Interruptor Abierto, TG-1 Turbogenerador en operación y TG-2 Turbogenerador en operación.

**Tabla 2. Ajustes de Frecuencia vs Tiempo antes de las mejoras al sistema.**

N <sup>o</sup>	Alimentadores	Carga del alimentador	Ajuste de frecuencia	Ajuste de tiempo
1	OH-2	0.86 MW	58.5 Hz	0 seg
2	OH-3 y 4	0.67 MW	58.5 Hz	0 seg
3	AL-2	2.60 MW	58.5 Hz	0 seg
4	CCD-2	0.75 MW	57.5 Hz	0 seg
5	AL-1	2.34 MW	57.0 Hz	0 seg

**Grupo-3;** Este opera con estas características, UT-1 Interruptor Abierto, UT-2 Interruptor Abierto, TG-1 Turbogenerador fuera de línea y TG-2 Turbogenerador en operación.

**Tabla 3. Ajustes de Frecuencia vs Tiempo antes de las mejoras al sistema.**

N <sup>o</sup>	Alimentadores	Carga del alimentador	Ajuste de frecuencia	Ajuste de tiempo
1	OH-2	0.86 MW	58.5 Hz	0 seg
2	OH-3 y 4	0.67 MW	58.5 Hz	0 seg
3	AL-2	2.60 MW	58.5 Hz	0 seg
4	CCD-2	0.75 MW	57.5 Hz	0 seg
5	AL-1	2.34 MW	57.0 Hz	0 seg



---

**Grupo-4;** Este opera con estas características, UT-1 Interruptor Abierto, UT-2 Interruptor Abierto, TG-1 Turbogenerador en operación y TG-2 Turbogenerador fuera de línea.

**Nota.** Además existe un relé denominado R5, destinado al disparo de los tres motores de 700 HP de la Planta de Espesadores (Bomba de agua de reboso 114-PU-1A, 114-PU-1B, 114-PU-1C), este es habilitado siempre y cuando se disparen ambos alimentadores UT-1 y UT-2 por protecciones a través del relé SR-750 y se confirme la apertura del interruptor de los mismos.

Estas cargas son las destinadas a operar ante una activación y disparo por baja frecuencia, para lo cual como se muestra en las tablas anteriores, estas presentan varios ajuste de disparo de magnitud y tiempo en función del grupo activado en los relés SR-750, las cuales en ocasiones, ante perturbaciones del SEN, han mal operado provocando la salida de operaciones de los turbogeneradores y por ende la parada total o parcial de la Empresa.

Los grupos de ajustes están en función de la potencia activa generada, la cual en su máxima capacidad se encuentra en el orden de los 16 MW, la cual depende del régimen de producción de la Empresa.

## **2.6 Mejoras del sistema de cascada de frecuencia.**

Para la mejora en este sistema y lograr una mejor respuesta en la velocidad de actuación de la misma. Se tuvieron en cuenta varias acciones entre ellas estuvieron:

1. Cambio de PLC S7-200 a PLC S7-300, a partir de que con esta sustitución se logrará la estandarización con respecto a la gran mayoría de todos los PLC instalados en la empresa, ya que las piezas de repuesto de los S7-200 se encuentran en estos momentos obsoletas en



---

inventario y este no ofrece una serie de ventajas tecnológicas que nos brindan los S7-300.

2. Proposición de nuevos ajuste, para la protección de baja frecuencia DAF. Al incorporarse este nuevo programador lógico se tienen que valorar los cambios a implementar, ya que con el cambio de PLC mejora mucho más la velocidad de operación de todo el sistema, y sobre la base de que se mejorarán los ajustes en los SR-750 (Multilin), se propondrán los nuevos valores de frecuencia y tiempo por los cuales deberá operar la DAF.
3. Visualización de pantalla mímica a través del sistema SCADA (Citect). Con el principal objetivo de lograr el monitoreo de las variables que intervienen en el sistema de descarga automática y el comportamiento en tiempo real de los grupos de ajuste de la cascada.

El sistema automático por frecuencia es un sistema que tiene como función primordial el de liberar capacidad en los turbogeneradores ante averías o fallas en el (SEN), este como ya se ha explicado anteriormente dispone de varios elementos que intervienen en la operación de la DAF, los cuales provocan demoras en la velocidad de repuesta de todo el sistema en general, entre ellos se encuentran:

- ✓ Relé de protección UR F60 instalados en los alimentadores de entrada a la Planta termoeléctrica, el cual tiene una velocidad de repuesta en el orden de los microsegundos.
- ✓ Interruptores de entrada a Planta Termoeléctrica modelos Altoms de 4 ciclos.
- ✓ PLC S7-300, el cual tiene una velocidad de repuesta en el orden de los microsegundos, muy superior a la instalada anteriormente con PLC S7-200 que está también en este rango de velocidad, pero más lento.



- 
- ✓ Relés Multilin SR-750, instalados en las cargas a liberar por defecto de frecuencia, el cual tiene una velocidad de repuesta en el orden de los milisegundos.
  - ✓ Interruptores de las cargas a liberar por defecto de frecuencia, modelos Altoms de 4 ciclos.

Todos ellos van creando una sumatoria de tiempo para la actuación final de la protección, lo cual influye negativamente en la recuperación de la estabilidad de los turbogeneradores, por lo que la repuesta de este sistema es vital para el correcto funcionamiento y recuperación de estos ante fallas o perturbaciones.

Como protección de respaldo de la DAF, existe el disparo a través del Gobernador Electrónico 505 (el mismo se muestra en el Anexo#3), el cual tiene ajustado un valor de 3400 rpm como disparo, equivalentes a 56.6Hz. Este, está diseñado para turbinas de una simple extracción. Su programación se hace directamente desde el panel de control mediante un sistema de menú y puede operar de forma aislada o en coordinación con otros sistemas. También tiene la posibilidad de conectarse a sistemas basados en PLC o de control distribuido, y es el encargado del control y monitoreo del sistema de velocidad de la turbina. Ambos turbogeneradores presentan un relé de protección de la Multilin SR-489, el cual entre sus funciones tiene habilitada la protección de baja frecuencia, pero la misma solo responde a valores de alarma, los cuales están ajustados a un valor de 59.2 Hz, con un tiempo de 1 segundo, la función de disparo se encuentra deshabilitada, ya que esta se le ha asignado al gobernador electrónico, el cual es el más específico para el control de este parámetro.



---

Como sistema de protección estos ajustes debe de tener coordinación entre ellos, por tal motivo la repuesta de la operación de disparo del gobernador electrónico debe de superar los valores de disparo de la DAF.

Los sistemas de protección por baja frecuencia (81, norma ANSIC) en sistemas eléctricos presentan diferentes ajustes en porciento de la frecuencia fundamental, estos a su vez, presentan varios escalones previamente seleccionados para la correcta liberación de carga en los turbogeneradores y por consecuente el alcance de la estabilidad de los mismos. Estos actúan con protección primaria, típicamente se puede tener un rechazo de la carga del 20 al 50% de la capacidad total en alrededor de 3 a 6 pasos, en este caso la carga a liberar en función de los valores de fallas de frecuencia alcanzan un 35% de la capacidad instalada en fábrica, la cual es alrededor de los 16.0 MW totales, la potencia generada por ambos turbogeneradores oscila entre el 80 y el 88% de la potencia consumida por las cargas de la Empresa. En esta tabla se muestran los ajustes estandarizados para la operación por baja frecuencia.

**Tabla 4. Ajustes estandarizados por escalones de los sistemas por baja frecuencia.**

<b>Escalones</b>	<b>% de ajuste</b>	<b>Tiempo (ciclos)</b>	<b>Tiempo (seg)</b>
<b>1</b>	1	20	0.2
<b>2</b>	2	20	0.2
<b>3</b>	3	15	0.2
<b>4</b>	3.7	15	0.2

La calibración de la protección 81OU, consiste básicamente en seleccionar frecuencia y tiempos de actuación, similares a los de las bandas de operación



---

de tiempo restringido, de la curva de frecuencia anormal de la turbina. Las funciones de sobre y baja frecuencia 81OU, disponibles presentan varias frecuencias de calibración permitiendo ajustar la protección con mayor precisión y así aprovechar al máximo los límites permitidos por la turbina, esto es especialmente importante en los relés de baja frecuencia, ya que esta condición aparece normalmente cuando el sistema está sobrecargado, por lo tanto, la salida adicional de un generador, reduciría aún más la frecuencia del sistema, ocasionando el disparo en cascada del resto de generadores por la operación de sus respectivos relés de baja frecuencia, la inestabilidad generada puede incluso llevar a un colapso total del sistema. Por esta razón, el relé 81U, deberá operar cuando en realidad la turbina haya superado los límites de frecuencia anormal.

Otro aspecto a tener en cuenta es el tiempo de operación de la protección 81OU, el cual afecta directamente los alabes de la turbina y consecuentemente su operación normal, debido a la inestabilidad del sistema y de la operación en regímenes no permitidos por el fabricante.

## **2.7 Ventajas adquiridas con las mejoras implementadas en el sistema DAF.**

Entre una de las ventajas estuvo el cambio del sistema de PLC S7-200 a PLC S7-300 (Ver foto en el Anexo #4), esta trajo consigo varias mejoras.

- 1- Mayor velocidad de respuesta para la activación de los diferentes grupos de ajustes de los relés SR-750 (Multilin) que a esta protección pertenecen.
- 2- Se logró comunicar el PLC S7-300 con el sistema SCADA Citect y de esta forma el monitoreo continuo de los diferentes grupos de ajuste activados.



- 
- 3- Se realizó en el Citect una pantalla con registros para visualizar el estado actual y así las lógicas de disparo de los interruptores.
  - 4- Se logró la estandarización de los recursos de repuesto, para casos de falla del sistema de PLC y accesorios.

Otras de las mejoras estuvieron encaminadas a la realización y visualización de una pantalla mímica a través del sistema SCADA (Citect), este con comunicación vía Ethernet con el PLC S7-300. Esto trajo consigo la ventaja del monitoreo continuo por parte del personal de operaciones y técnicos, para comprobar el correcto funcionamiento de todo el sistema, en el cual se reflejan los grupos de ajustes activados de los diferentes relé de protección SR-750, los estados de los interruptores que a ella pertenecen y la diferenciación en colores para una mejor interacción hombre –máquina (Ver como se muestra en el Anexo#1).

Anterior a este trabajo no se contaba con una pantalla mímica, que reflejara estas condiciones de trabajo, lo cual provocaba demora en la visualización en tiempo real de los grupos activados por parte del personal de operaciones y técnicos.

## **2.8 Confección de los procedimientos de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la DAF.**

### **Procedimiento realizado para el cambio de PLC S7-200 a S7-300.**

1. Tener disponible y cerrados los dos interruptores de las líneas de 110 kV (PS-101 y PS-102).
2. Cerrar interruptor TIE de la Subestación de 110 kV.
3. Cerrar interruptores UT-1 y UT-2 en Planta termoeléctrica.
4. Tener disponible los dos Turbogeneradores TG-1 y TG-2.



- 
5. Habilitar en los interruptores AL-1, AL-2 y CCD-2 disparo instantáneo en el Grupo #1 a 57.5 Hz con 0 seg (Input. 4).
  6. Desconectar los breaker (interruptor) de control del PLC de la cascada de frecuencia.
  7. Realizar cambio de PLC de S7-200 a S7-300.
  8. Realizar pruebas al sistema de protección de cascada de frecuencia de forma general.
  9. Normalizar el punto 5.

**Nota.** Con la realización del punto #5, se lograría que si por alguna razón existiese un disparo de los interruptores UT-1 y UT-2, se dispararían los interruptores AL-1, AL-2 y CCD-2, liberando una carga de alrededor de 4.5 MW, impidiendo esta acción la sobrecarga en los turbogeneradores.

## **2.9 Operaciones realizadas para la comprobación del correcto funcionamiento del sistema DAF.**

Teniendo en cuenta la complejidad de esta prueba, debido al riesgo que podía traer un error humano, se confeccionó un cronograma de pruebas, del funcionamiento del sistema, este comprendió todas las formas de operación de la DAF.

Breve explicación de las pruebas realizadas, concentradas en grupos de los estados de los contactos auxiliares, según se refleja en el (Anexo#2).

### Pruebas # 1, 2 y 3.

Esta prueba estuvo enmarcada en demostrar la operación correcta del grupo 1 de los interruptores de la cascada de frecuencia.

### Pruebas # 4, 5 y 6.



---

En estas pruebas se corroboró la activación correcta de los grupos 2, 3 y 4 de los interruptores de la cascada de frecuencia, así como la no activación del disparo de los motores de 700 HP de Planta de Espesadores

Pruebas # 7, 8 y 9.

En estas pruebas se corroboró la activación correcta de los grupos 2, 3 y 4 de los interruptores de la cascada de frecuencia, así como la activación del disparo de los motores de 700 HP de Planta de Espesadores.

Pruebas # 10, 11 y 12 y 13.

Ésta estuvo enmarcada en demostrar la operación correcta del grupo 1 de los interruptores de la cascada de frecuencia.

**Nota.** Las operaciones realizadas sobre los interruptores UT-1, UT-2, TG-1 y TG-2, fueron simuladas a través de los contactos auxiliares.



---

## **Capítulo #3 Análisis de los resultados y valoración técnica económica.**

### **3.1 Introducción.**

Los ajustes aplicados en este trabajo se enfocaron principalmente en los parámetros de los dispositivos de protección ya existentes en Planta Termoeléctrica, en singular, la Descarga Automática por Frecuencia, por lo que el análisis técnico se enfoca preferentemente en el aporte económico, al valorar la importancia de contar con los ajustes para la no ocurrencia de una mala operación de la DAF.

### **3.2 Análisis técnico.**

A raíz de los ajustes analizados en el Capítulo 2 para las protecciones de subfrecuencia, se realizó un análisis técnico en cuanto a los ajustes de las variantes a implementar para los diferentes grupos de operación de la (DAF), con el objetivo de lograr una mayor fiabilidad y velocidad de respuesta de la protección para el empleo de estas propuestas. A continuación se proponen los diferentes ajustes de los grupos de actuación de la cascada.

### **3.3 Propuesta de solución del problema.**

A partir de todos los problemas en que se incurrieron, los ajustes existentes en la Protección de Descarga Automática por Frecuencia y después de las pruebas realizadas en el Lab. Eléctrico de la Empresa, se proponen los siguientes cambios en dichos ajustes, ya que con estos se logrará el buen funcionamiento de la cascada de frecuencia y por ende una mayor confiabilidad en el sistema de protección.



---

### 3.3.1 Ajustes de la descarga automática por frecuencia, después de la implementación de los cambios.

En las tablas 5, 6 y 7 se muestran los ajustes propuestos e implementados en los relés de protección SR-750 de los alimentadores pertenecientes a la cascada.

**Tabla 5. Nuevos ajustes propuestos para el mejor funcionamiento de la DAF.**

Nº	Alimentadores	Carga del Alimentador	Ajuste de frecuencia	Ajuste de tiempo
1	OH-2	0.86 MW	58.8 Hz	0.2
2	OH-3 y 4	0.67 MW	58.8 Hz	0.2
3	AL-2	2.60 MW	58.5 Hz	0.2
4	CCD-2	0.75 MW	58.2 Hz	0.2
5	AL-1	2.34 MW	57.8 Hz	0.2

**Grupo-2;** Este opera con estas características, UT-1 Interruptor Abierto, UT-2 Interruptor Abierto, TG-1 Turbogenerador en operación y TG-2 Turbogenerador en operación.



**Tabla 6. Nuevos ajustes propuestos para el mejor funcionamiento de la DAF.**

Nº	Alimentadores	Carga del Alimentador	Ajuste de frecuencia	Ajuste de tiempo
1	OH-2	0.86 MW	58.8 Hz	0 seg
2	OH-3 y 4	0.67 MW	58.8 Hz	0 seg
3	AL-2	2.60 MW	58.5 Hz	0 seg
4	CCD-2	0.75 MW	58.2 Hz	0 seg
5	AL-1	2.34 MW	57.8 Hz	0 seg

**Grupo-3;** Este opera con estas características, UT-1 Interruptor Abierto, UT-2 Interruptor Abierto, TG-1 Turbogenerador fuera de línea y TG-2 Turbogenerador en operación.

**Tabla 7. Nuevos ajustes propuestos para el mejor funcionamiento de la DAF.**

Nº	Alimentadores	Carga del Alimentador	Ajuste de frecuencia	Ajuste de tiempo
1	OH-2	0.86 MW	58.8 Hz	0 seg
2	OH-3 y 4	0.67 MW	58.8 Hz	0 seg
3	AL-2	2.60 MW	58.5 Hz	0 seg
4	CCD-2	0.75 MW	58.2 Hz	0 seg
5	AL-1	2.34 MW	57.8 Hz	0 seg

**Grupo-4;** Este opera con estas características, UT-1 Interruptor Abierto, UT-2 Interruptor Abierto, TG-1 Turbogenerador en operación y TG-2 Turbogenerador fuera de línea.



---

Como se aprecia en las tablas anteriores, los valores están en función de los porcentos establecidos para los disparos por baja frecuencia, los tiempos ajustados en función de estudios realizados en centrales termoeléctricas, así como de los análisis realizados a partir de eventos ocurridos en la Planta Termoeléctrica. Los grupos 2 y 3 teniendo en cuenta la capacidad de generación limitada a un solo turbogenerador (7.5 MW), se establecieron ajustes de tiempo instantáneo, para lograr una separación inmediata y así evitar una caída total de todo el sistema energético de la Empresa.

Estos valores de ajustes están en coordinación con los valores establecidos por el fabricante y previamente programados en el gobernador electrónico, el cual presenta un ajuste de 56.6 Hz para el disparo (trip), dejando un margen de disponibilidad para la operación y regulación del gobernador en el sistema de válvula de la turbina del 2.1% desde la velocidad crítica (frecuencia mínima), hasta el valor inferior de ajuste de disparo de la cascada de frecuencia DAF.



---

### 3.4 Valoración Económica.

Atendiendo al costo de la inversión realizada por la empresa para implementar las mejoras al sistema de Descarga Automática por Frecuencia (DAF), el cual es:

Descripción.	Pais de Origen	Precio(USD)
Rack (base).	Alemania.	\$450.59
Memoria.	Alemania.	\$1.581.22
Entrada digital.	Alemania.	\$571.75
Salida digital.	Alemania.	\$933.55
CPU.	Alemania.	\$9.606.80
Fuente.	Alemania.	\$1.047.60
<b>Total</b>		<b>\$14.191.51</b>

Al presentar la parte económica que más se afectaría, en este caso la producción de Ni+Co, se valoraría que:

La empresa a razón de 24 hrs produce aproximadamente 103 Ton de mineral exportable, el mismo está en el mercado mundial a \$9.860.98 la tonelada en estos momentos, lo que provocaría una pérdida de \$1.015.680.94, lo cual en este punto si tendría una fuerte significación para la entidad productora y el país en general.



---

### 3.5 Análisis del TIR y el VAN.

TIR es la abreviatura utilizada habitualmente para denominar la tasa interna de rentabilidad o de retorno de un proyecto de inversión. Este concepto tiene una utilidad particular cuando se quiere conocer la rentabilidad que se genera en un proyecto de inversión que requiere una serie de desembolsos a lo largo del tiempo y que, también en distintos momentos, permite obtener una serie de ingresos.

#### VALOR ACTUAL NETO (VAN).

Es la diferencia entre el valor actual de los ingresos y el valor actual de los egresos, descontados a una determinada tasa. Si el valor actual de los ingresos es mayor que el valor actual de los egresos, se obtendrá un valor actual neto positivo, lo que indica que la propuesta debe ser aceptada, en caso contrario debería ser rechazada.

Ventajas: Reconoce explícitamente el valor tiempo del dinero, además da indicaciones sobre la magnitud del beneficio que se obtiene por la inversión.

Desventaja: No da indicaciones sobre el rendimiento que se obtiene de la inversión.

Para el análisis económico se tuvo en cuenta, lo que representaría para la Empresa la sustitución del PLC, considerando una pérdida de producción de 4 ton/h de Ni+Co, para un tiempo de vida útil del equipo de 15 años, obteniéndose los siguientes beneficios:

TIR: 180.1%

VAN (15%): \$12 000

Tiempo de recuperación de la inversión: 0.4 años (5 meses)

A pesar de no ser este un alto valor de costo de inversión, no deja de tener importancia para la empresa, ya que realizando esta, se garantiza el buen



---

---

funcionamiento de la cascada de frecuencia y en su conjunto la estable operación de los turbogeneradores. De no haberse realizado la compra de este PLC, esta protección se mantendría en un régimen de funcionamiento defectuoso respecto a la velocidad de actuación de la misma ante la desconexión del SEN, lo que se conoce por eventos pasados en su mal funcionamiento, que traería como consecuencia el paro total de la empresa, y es aquí donde se empieza a sentir un impacto económico-medioambiental más potente.

### **3.6 Análisis Medioambiental.**

Por afectaciones directas al medio ambiente también se deberían ver las incidencias negativas que tendría sobre este, ya que , un paro de los procesos productivos implicaría la salida de servicio de determinadas partes y equipos de la fábrica que están destinados a reducir de manera constante la emisión de gases de efecto invernadero, en específico en la planta de Sulfuros.

La misma no se encuentra habilitada en los grupos de ajuste de la cascada, pero al encontrarse una parte de esta planta de proceso enlazada con Planta de Acido, quedaría fuera de funcionamiento por la parada de los compresores de H<sub>2</sub>S, que en automático detendría todo el complejo y todo el gas que se encuentra en las líneas se desplazaría al quemador, donde se vertería directo a la atmosfera.

Por otra parte a citar, con efecto negativo sobre el medio ambiente, sería el de planta de Lixiviación, la misma ante una caída de la energía no podría mantener por mucho tiempo el mineral en los reactores, lo que provocaría el drenaje de dicha Planta, esto traería como consecuencia un vertimiento de mineral con ácido sulfúrico por encima de los valores permitidos al rio Cabaña, lo que contaminaría aún más el manto freático de la zona, y este rio al desembocar al



---

mar produciría con esa carga contaminante una severa afectación en el litoral costero de las distintas especies marinas.

## **Conclusiones generales.**

Todos los trabajos que se han desarrollado en el tema de referencia han sido encaminados a mejorar de forma confiable el sistema de descarga automática por frecuencia DAF, con el principal objetivo, de demostrar que logrando una óptima operación del mismo se evitan grandes pérdidas materiales y económicas.

Este trabajo de diploma dio respuesta a la correcta factibilidad y confiabilidad del trabajo de la protección DAF ante posibles fallas del sistema Electroenergético Nacional SEN, valiendo sus resultados en los nuevos ajustes a implementar en Planta Termoeléctrica en dicho sistema de protección, garantizando a su vez la mejora de la velocidad de repuesta y la coordinación de esta protección.

Con este trabajo se logró implementar la mejora propuesta de cambio de PLC, y a continuación del cambio efectuado, se logró dar cumplimiento a todas las tareas propuestas. En el desarrollo del tema se logró, aparte de lo ya expuesto, la visualización de los valores reales con la creación de la pantalla de monitoreo en el (SCADA) citect.

Todo esto se materializó a partir de la búsqueda de información de eventos pasados de la mala operación de la DAF como tarea primaria del estudio realizado. Se describe detalladamente como opera la cascada de frecuencia antes y después de la implementación de los cambios realizados a este sistema.



---

## **Recomendaciones.**

Como parte de las continuas mejoras al sistema de protección y en especial a la protección objeto de estudio, este trabajo recomienda:

Programar la lógica en los relés universales (UR) de última generación UR F60, instalados en los alimentadores provenientes del SEN, denominados UT-1 y UT-2, con el objetivo de reducir costos de equipamiento, aumentar aún más la velocidad de repuesta de todo el sistema.

Además serviría para establecer prioridades entre los relés para las operaciones de su funcionamiento, estas actuarían de respaldo entre los relés UR, sirviendo como sistemas Máster- Esclavo, para situaciones de fallas internas en los mismos, la idea estaría enfocada en la comunicación de los relés pertenecientes a los UT's y relés de los TG's, para conocer el comportamiento de la potencia de generación y demandadas por las cargas, para en función de esta desconectar los interruptores necesarios sin incurrir en separación de cargas innecesarias.

Crear los lazos de comunicación vía Fibra Óptica con el UR F60, lo cual aceleraría aún más las operaciones y la confiabilidad de todo el sistema.



---

## **Bibliografías.**

- [1] Yordilexis, Pelier Samón Leonardo y Díaz Aguirre, *Metodología para la selección y Coordinación de Protecciones Eléctricas*. Moa: s.n., 2004.
- [2] GE Industrial, Canadá: s.n., Multilin, 750/760 Feeder Management Relay, 2004.
- [3] William Stevenson, *Análisis de los sistemas eléctricos de potencia*, Edición Revolucionaria ed. 1986, La Habana.
- [4] Catálogo de PLC S7, "Siemens," 2012-2014.
- [5] Manual de sistema de protecciones.
- [6] Colectivo de Autores, *Manual de operaciones del sistema eléctrico de la PSA..* Moa, 2002.
- [7] Colectivos de Autores, "Protecciones eléctricas en sistemas industriales,".
- [8] A y Rodríguez Feodorov, "Suministros Eléctricos de Potencia,".
- [9] Colectivo de autores, "Manual de operaciones del sistema eléctrico de la PSA," Moa, 2002.
- [10] Fing, Curso de Estabilidad de Sistemas Eléctricos de Potencia, 2007.
- [11] Iván Ramiro Freire, *Protecciones de Generadores Eléctricos Mediante Relés Microprocesados Multifuncionales*.



---

[12] *Criterios Generales de Protección de los Sistemas Eléctricos Insulares y Extra peninsulares.*, Diciembre 2005.

[13] Gilberto Carrillo Caicedo, *Protecciones Electricas ( Notas de Clase)*.

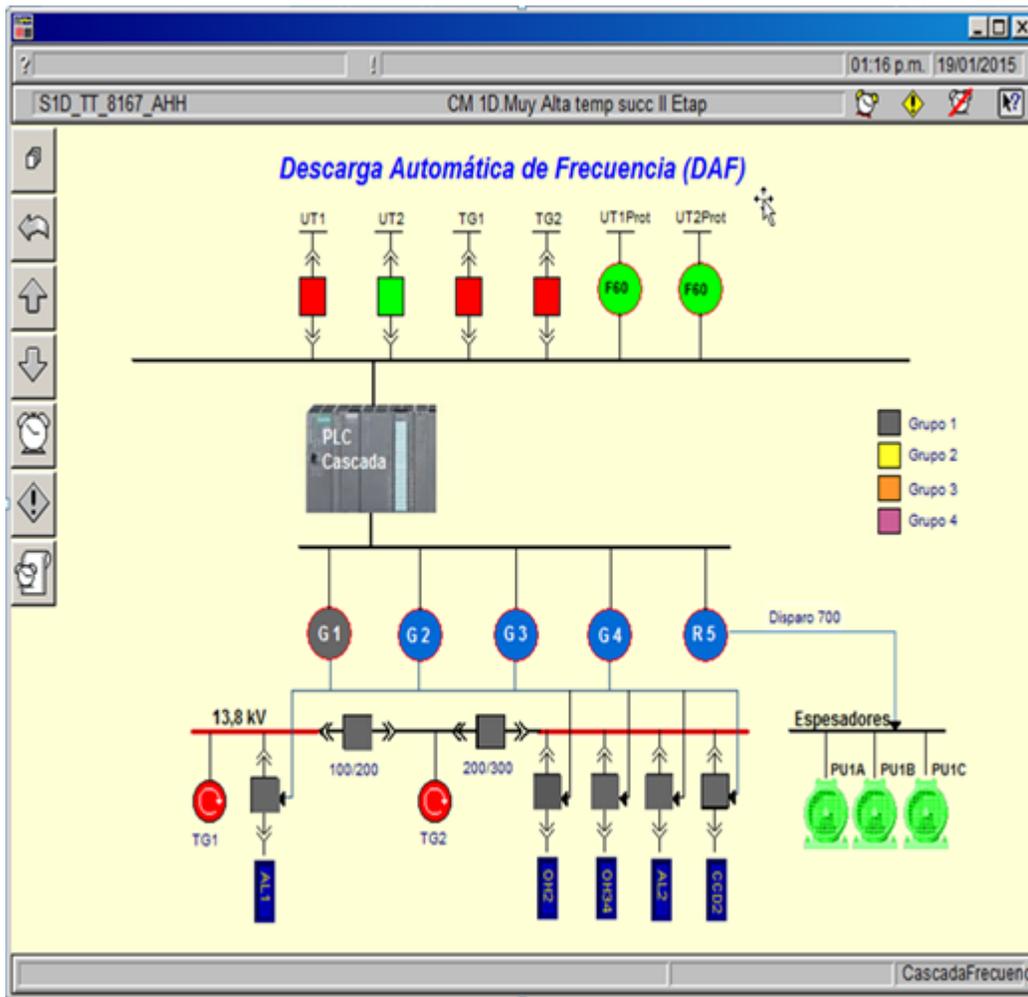
**Software utilizado.**

- Librería Virtual de Protecciones Eléctricas.
- Paquete Microsoft Office (Word, Excel, Power Point).
- Herramientas Del Total Commander.



## ANEXOS

Anexo #.1 Pantalla mímica del comportamiento en tiempo real de la cascada.



**Anexo#2.** Tabla de pruebas realizadas al PLC S7-300 en Laboratorio Eléctrico.

Equipos	Estado de los contactos auxiliares												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
UT-1	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON
UT-2	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	ON	OFF
TG-1	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF	ON
TG-2	ON	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON	ON	OFF
UT-1 Protecciones	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF
UT-2 Protecciones	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON
<b>Grupo 1</b>	<b>ON</b>	<b>ON</b>	<b>ON</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	<b>ON</b>	<b>ON</b>	<b>ON</b>	<b>ON</b>
<b>Grupo 2</b>	OFF	OFF	OFF	<b>ON</b>	OFF	OFF	<b>ON</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>Grupo 3</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	<b>ON</b>	OFF	OFF	<b>ON</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>Grupo 4</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	<b>ON</b>	OFF	OFF	<b>ON</b>	OFF	OFF	OFF	OFF
<b>Disparo 700 HP</b>	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	<b>ON</b>	<b>ON</b>	<b>ON</b>	OFF	OFF	OFF	OFF
	<b>OPERACIÓN MANUAL DEL OPERADOR</b>						<b>OPERACIÓN AUTOMÁTICA DE LAS PROTECCIONES</b>						

**Leyenda.**

**ON** ---- Interruptor cerrado o Grupo activado.  
**OFF** --- Interruptor abierto o Grupo desactivado.



**Anexo #3. Gobernadores Electrónicos 505.**



**Anexo #4. PLC S7-300 de la cascada de frecuencia.**



---

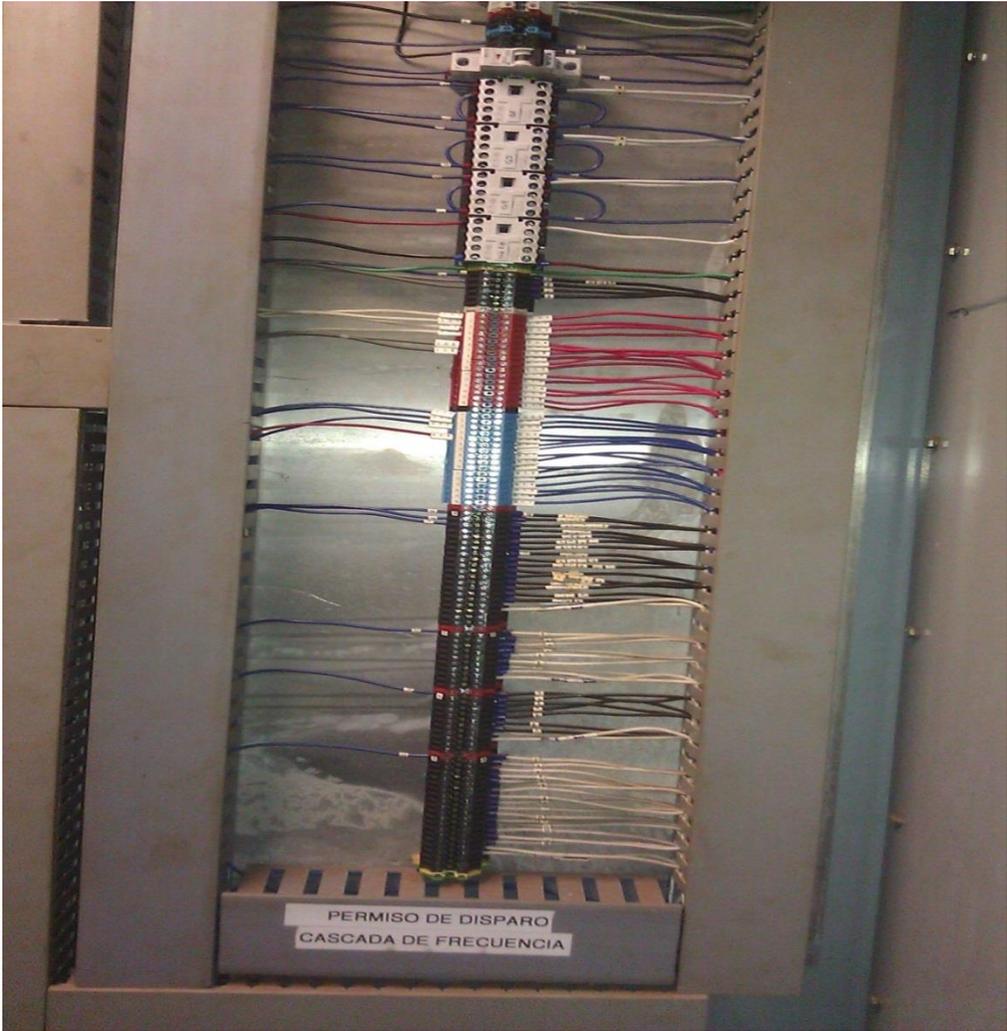
**Anexo #5. Multilin de las cargas SR-750.**



**Anexo #6. Cubiculo de fuerza y control del TG-2.**



**Anexo #7. Interconexión eléctrica de la DAF.**



---

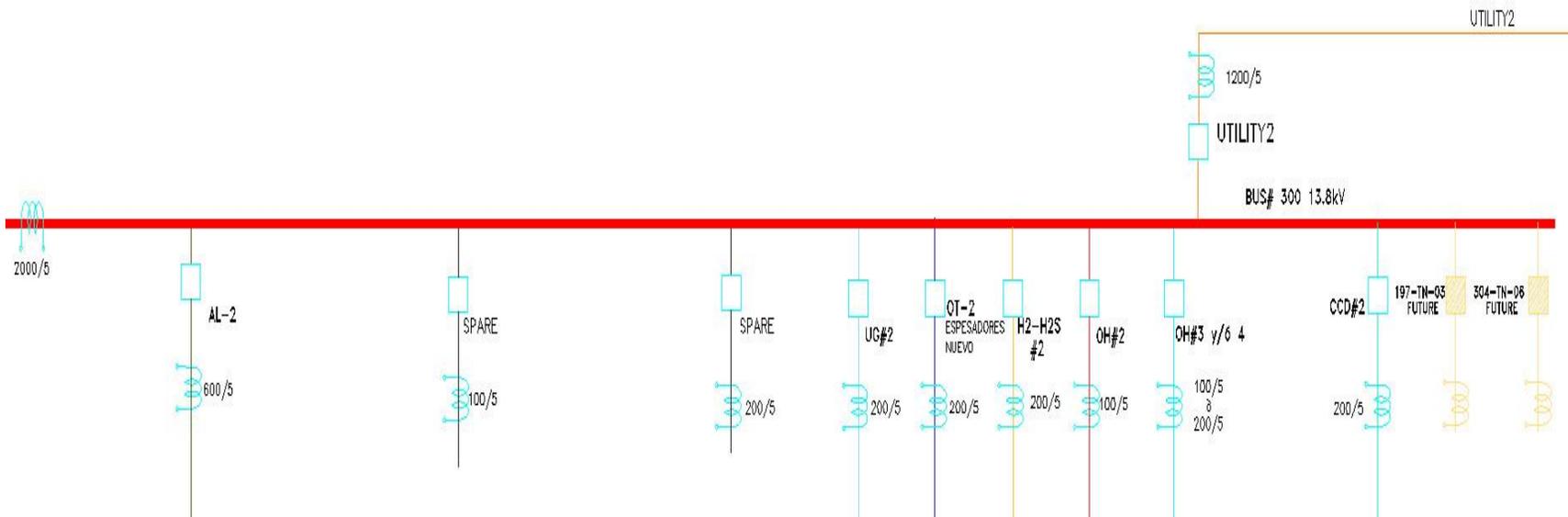
**Anexo #8. Vista general de los turbogeneradores y la pizarra maestra (13.8KV) de temoelectrica.**



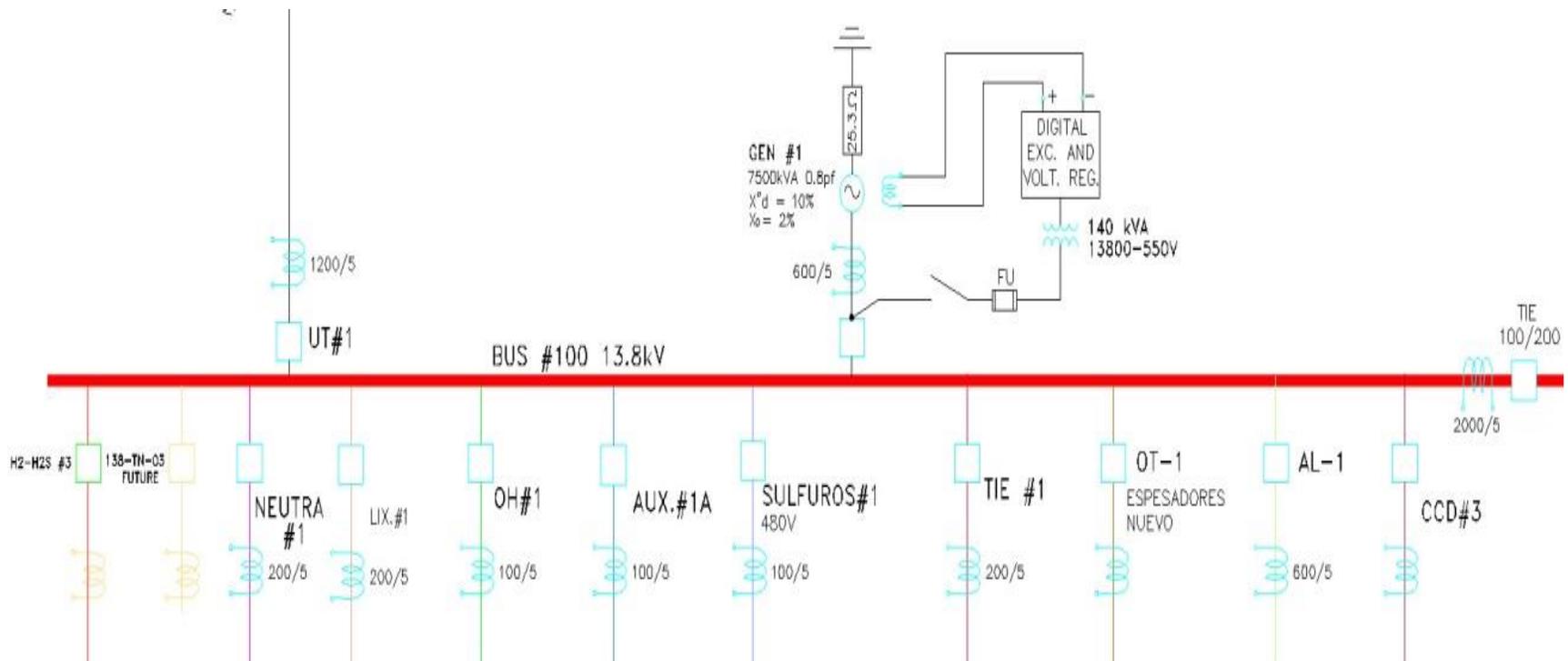
**Anexo #9. Cubiculo de control y fuerza del UT-1.**



## Anexo #10. Monolineal seccion 300.



## Anexo #11. Monolineal seccion 100.



Trabajo de diploma

Manuel Llorens Patiño

## Anexo #12. Monolineal seccion 200.

